

ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ПЛАХОТНИЙ ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

УДК 621.9.048.4 : 621.9.047.7

ДИСЕРТАЦІЯ
НАУКОВІ ЗАСАДИ КОМБІНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ
ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ
ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

Спеціальність 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



О.П. Плахотний

Науковий консультант Осипенко Василь Іванович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Плахотний О.П. Наукові засади комбінованої технології електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки» (13 – Механічна інженерія). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Роботу присвячено подальшому розвитку науково-технологічних засад комбінованої дротяної електроерозійної та електрохімічної обробки, створенні системи багатofакторного розрахунку параметрів обладнання і технологій для досягнення максимальних технологічних характеристик процесу та отримання можливості керованого формування поверхонь з новими заданими геометричними і фізико-хімічними параметрами.

У вступі розкрито суть та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, викладено наукові положення, які виносяться на захист, наведені дані про публікації та апробацію роботи.

У *першому розділі* виконано огляд літературних джерел та проведено аналіз сучасного стану та напрямків розвитку електроерозійних вирізних та електрохімічних розмірних технологій обробки матеріалів. Встановлено, що існує потреба в розробці нетермічних технологій покращення якості поверхні після ЕЕВО. Теплова дія іскрових розрядів принципово не дає можливості отримати повну відсутність переплавленого шару і зони термічного впливу на поверхні обробленої деталі, як того передбачають сучасні вимоги. Разом з тим сучасні показники вихідних параметрів розмірної електрохімічної обробки імпульсним струмом свідчать про її переваги в порівнянні з іншими про-

цесами фінішування поверхні і можливість ефективного застосування в поєднанні з ЕЕВО. Отже на сьогодні склалися передумови розробки комбінованої електроерозійної і електрохімічної технології для розмірної обробки матеріалів, яка б поєднувала високу продуктивність електроерозії і чистоту поверхні при електрохімічному розчиненні.

В другому розділі наводиться опис експериментальної бази досліджень – експериментального технологічного комплексу на базі електроерозійного вирізного верстату СЕЛД-02, доповненого обладнанням для здійснення електрохімічної обробки, а також стандартних, модифікованих та спеціально розроблених приладів та матеріалів. Запропонована та реалізована загальна апаратна схема експериментального комплексу для дослідження базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дріт'яним електродом за умов близьких до практичної реалізації конкретних завдань новітньої комбінованої технології послідовного застосування електроерозійної та електрохімічної обробки дріт'яним електродом.

Розроблені оригінальні розрахунково-експериментальні методики досліджень. Створено комплекс математичних моделей з використанням CFD та CAE методів, проведено їх обґрунтування для досліджень та розрахунків параметрів базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дріт'яним електродом.

Третій розділ присвячений встановленню фізико-технологічних закономірностей електроерозійної руйнації та формування приповерхневих шарів електродів розрядами малої тривалості та енергії.

На основі аналізу відомих результатів експериментальних та теоретичних досліджень сформульовані спрощуючі припущення, які дозволяють виконувати обчислювальні експерименти з використанням тривимірної моделі теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трьохфазної задачі теплопровідності без суттєвої втрати адекватності математичної моделі реальним фізичним процесам ерозійної руйнації, що відбуваються в зоні дії іскрового розряду.

Запропоновано та обґрунтовано методику визначення глибини зони термічного впливу та параметрів шорсткості поверхонь, сформованих послідовністю дії розрядів, характерних для електроерозійного дротяного вирізання.

В четвертому розділі наведено результати досліджень процесів приповерхневого анодного розчинення при електрохімічній обробці мікросекундними імпульсами струму.

Проведеним комплексом експериментальних досліджень уточнено величини коефіцієнтів виходу за струмом в залежності від густини імпульсного струму та структури утвореної попередньою термічною обробкою матеріалу при електрохімічному розчиненні ARMC0 заліза та сталей X12Ф1, У8А, ШХ15, Сталь 45.

Запропоновано та обґрунтовано використання в якості критеріїв оцінки локалізації процесу анодного розчинення величини зони розчинення та ексцесів розподілу густини струму при використанні технологій ЕХОДЕ.

На основі співставлення отриманих розподілу швидкостей потоку електроліту та точного аналітично представленого розподілу струму на поверхні аноду запропонована методика узгодження гідравлічних режимів течії електроліту з амплітудно-часовими параметрами імпульсного джерела живлення. Її використання дозволяє для кожного конкретного випадку висоти деталі, величини МЕР, параметрів подачі електроліту проектувати амплітудно-часові параметри імпульсів струму, які забезпечують рівномірність та стабільність розчинення по всій висоті обробки. Експериментальна перевірка підтвердила ефективність практичного використання отриманих результатів досліджень та їх сприяння підвищенню стабільності та прогнозованості електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом як технології.

Запропонована вдосконалена методика розрахунку кількісних параметрів процесу анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів, що мають нерівномірні по товщині електрохімічні характеристики, яка дозволяє уточнити чисельні значення коефіцієнтів електрохімічного розчинення поверхневих шарів сталі та може забезпечити суттєве підвищен-

ня точності розрахунків параметрів процесів електрохімічної модифікації поверхонь дротяним електродом.

П'ятий розділ присвячений розробці методів забезпечення точності формоутворення елементів складноконтурних поверхонь за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

На підставі комплексу експериментальних і теоретичних досліджень запропонована розрахунково-експериментальна методика і отримані рівняння для розрахунку величини розподіленого зовнішнього навантаження, що діє на дріт при різанні певних груп сталей і твердих сплавів. Отримані результати дозволяють на етапі проектування технологічного процесу розрахувати дійсну форму дротяного електрода і, з її урахуванням, будувати технологію обробки і відповідну траєкторію руху приводів верстата.

Розроблена і випробувана методика математичного комп'ютерного розрахунку розподілу густини технологічного струму в тривимірній постановці для конфігурації плоский анод – циліндричний катод, яка допомагає прогнозувати точність формоутворення при проектуванні процесу обробки за комбінованою технологією послідовного застосування ЕЕВО ДЕ та ЕХРО.

Запропоновано технологічний прийом з використанням ізоляторів на ДЕІ, який при застосуванні разом з математичним апаратом розрахунку електростатичних полів зменшує величину зони нерівномірності розподілу густини струму на гранях заготовки і, відповідно, припуск на усунення зон підвищеного електрохімічного розчинення.

В шостому розділі проведено структурування та систематизацію результатів комплексу експериментальних та теоретичних досліджень і розроблено САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дротяним електродом, яка дозволяє проектувати ефективні технологічні процеси і відповідно отримувати деталі з заданими та контрольованими параметрами геометричної точності, мікрогеометрії поверхні та структури поверхневих шарів.

Розроблена САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дротяним електродом пройшла успішну апробацію при проектуванні технологічних процесів виготовлення полюсів квадрупольних лінз для іонних мікроскопів. Крім того результати досліджень впроваджено у виробничих процесах підприємств ТОВ «Черкасиелеватормаш», ДП НВК «Фотоприлад», м. Черкаси, ЗАТ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Прогрес», м. Запоріжжя, що підтверджено відповідними актами.

Ключові слова: електроерозійна вирізна обробка, імпульсна електрохімічна обробка, комбінована технологія ЕЕДВ/ЕХРО, формоутворення поверхні, прогин дротяного електроду, шорсткість поверхні, переплавлений шар, зона термічного впливу, фінішування поверхні.

ANNOTATION

Plakhotnyi O.P. Scientific principles of the combined technology of wire electrodischarge and electrochemical machining. – Qualification scientific work presented as manuscript.

Thesis for doctor degree of technical sciences by specialty 05.03.07 "Processes of Physical and Technical Processing" (13 – Mechanical engineering). – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The work is devoted to further development of scientific and technological principles of combined wire electrical discharge and wire electrochemical machining (WEDM and WECM), creation of a system of multifactor calculation of equipment parameters and technologies to achieve maximum technological characteristics of the process and obtain controlled surface formation with new geometric and physicochemical parameters.

The introduction reveals the essence and state of the scientific problem, substantiates the relevance of the dissertation, formulates the purpose and objectives

of research, sets out the scientific provisions that are submitted for defense, provides data on publications and testing of the work.

In the first section the review of literature sources is carried out. Also the analysis of a modern condition and directions of development of WEDM cutting and WECM dimensional technologies of processing of materials is carried out. It is established that there is a need to develop non-thermal technologies that improve surface quality after WEDM cutting. The thermal action of spark discharges conceptually does not allow to obtain the complete absence of the remelted layer and the heat-affected zone (HAZ) on the surface of the machined part, as required by modern industries. At the same time, resulting parameters of modern dimensional wire electrochemical machining with a pulse current testify to its advantages in comparison with other surface finishing techniques and possibility of effective application in combination with WEDM cutting. So today there are prerequisites for the development of a combined electrical discharge and electrochemical technology for dimensional processing of materials, which would combine high productivity of EDM and surface cleanliness of electrochemical dissolution.

The second section describes the experimental research base – an experimental technological complex based on electrical discharge cutting machine SELD-02, supplemented by equipment for electrochemical machining, as well as standard, modified and specially designed devices and materials. There was proposed and realized the general hardware scheme of the experimental complex for research of basic processes of wire electrical discharge and wire electrochemical machining for conditions close to the practical realization of concrete tasks of the newest combined technology of consecutive application of WEDM and WECM.

Original computational and experimental research methods have been developed. A set of mathematical models using CFD and CAE methods has been created, their substantiation for researches and calculations of parameters of basic processes of WEDM and WECM is carried out.

The third section is devoted to the establishment of physical and technological patterns of material removal using electrical discharges and the formation of near-surface layers of electrodes by discharges of short duration and energy.

Based on the analysis of known results of experimental and theoretical studies, simplifying assumptions are formulated that allow to conduct computational experiments using a three-dimensional model of thermal processes of electrode material removal based on the numerical solution of three-phase thermal conductivity problem without significant loss of adequacy of a mathematical model of real physical processes, which occur in the area of the spark discharge.

The method of determining the depth of the HAZ and the parameters of surface roughness formed by the sequence of discharges typical for WEDM cutting is proposed and substantiated.

The fourth section presents the results of studies of the near-surface anodic dissolution processes during electrochemical machining with microsecond current pulses.

The complex of experimental researches specified the values of current efficiency coefficients depending on the pulse current density and the structure formed by preliminary heat treatment of the material during the electrochemical dissolution of ARMCO iron and steels H12F1, U8A, SchH15, Steel 45.

The use of the size of the dissolution zone and the excesses of the current density distribution for WECM technologies as criteria for estimating the localization of the anodic dissolution process is proposed and substantiated.

Based on the comparison of the obtained electrolyte flow velocity distribution and the accurate analytically presented current distribution on the anode surface, a method of coordinating the hydraulic modes of electrolyte flow with the amplitude-time parameters of the power supply is proposed. Use of this method allows for each case of the height of the part, the size of the inter-electrode gap, the parameters of the electrolyte supply to design the amplitude-time parameters of the current pulses, which ensure uniformity and stability of dissolution throughout the machining height. Experimental verification confirmed the effectiveness of the

practical use of the obtained research results and their contribution to improving the stability and predictability of electrochemical dimensional machining with a wire electrode as a technology.

An improved method for calculating quantitative parameters of the process of anodic dissolution of WEDM-modified surface with uneven in depth electrochemical characteristics is proposed, which allows to specify the numerical values of the coefficients of electrochemical dissolution of steel surfaces` layers and can provide a significant increase in the accuracy of calculations of the parameters of the processes of electrochemical modification of surfaces by a wire electrode.

The fifth section is devoted to the development of methods that ensure the accuracy of the formation of elements of complex contour surfaces by a combined technology of electrical discharge and electrochemical machining with a wire electrode.

On the basis of a complex of experimental and theoretical researches, the computational-experimental technique is offered. Also obtained the equations for calculation of the value of the distributed external load applied to a wire during cutting of certain groups of steels and hard alloys. The obtained results allow at the design stage of the technological process to calculate the actual shape of the wire electrode and, taking it into account, to build the machining technology and the corresponding trajectory of the machine drives.

A method of mathematical computer calculation of technological current density distribution in three-dimensional formulation for flat anode and cylindrical cathode configuration has been developed and tested, which helps to predict the accuracy of shaping when designing the machining process of combined technology of sequential application of WEDM cutting and WECM.

A technological method using insulators on wire tool electrode is proposed, which when used together with the mathematical apparatus for calculating electrostatic fields reduces the size of the zone of non-uniformity of current density distribution on the facets of the workpiece and, accordingly, reduces the allowance for elimination of zones of increased electrochemical dissolution.

In the sixth section the results of a complex of experimental and theoretical researches are structured and systematized and the CAD of combined electrical discharge and electrochemical machining of steels by a wire electrode is developed, which allows to design effective technological processes and, accordingly, to receive details with predicted and controlled parameters of geometrical accuracy, surface microgeometry and structure of surface layers.

Developed CAD of combined WEDM and WECM of steels has been successfully tested in the design of technological processes for the manufacture of poles of quadrupole lenses for ion microscopes. In addition, the research results were implemented in the production processes of “Cherkasyelevatormash” LLC, “Fotoprilad” State Enterprise, Cherkasy, “Motor Sich” CJSC, “Progress” State Enterprise, Zaporizhia, which was confirmed by the relevant acts.

Keywords: wire electrical discharge machining, pulsed electrochemical machining, EDM/ECM combined process, surface shape accuracy, wire-electrode deflection, surface roughness, recast layer, heat affected zone, surface finishing.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Осипенко В. І. Фізика і технологія електроерозійного дротяного вирізання: монографія / В. І. Осипенко, О. П. Плахотний, Н. В. Філімонова ; Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси, 2019. – 251 с.

Здобувачем запропоновано ряд математичних моделей теплової руйнації матеріалу за дії іскрових розрядів, формоутворення поверхні гнучким дротяним електродом, що становлять наукові засади ЕЕДВ.

2. Plakhotnyi O. Forming and finishing surface by sequential electrochemical-electrodischarge machining of precision magnetic optics parts / O. Plakhotnyi, V. Osypenko // Int. J. Machining and Machinability of Materials. – 2020. – Vol. 22. – No. 3/4. – P. 331–347. DOI: [10.1504/IJMMM.2020.107061](https://doi.org/10.1504/IJMMM.2020.107061). *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в Scopus.*

Здобувачем запропоновано й експериментально перевірено методiku розрахунку параметрів електрохімічної обробки дротяним електродом гіперболічної лінійчатої поверхні після електроерозійного вирізання.

3. Osypenko V. I. Determination of power factors affecting surface formation in the process of electrical discharge machining / V. I. Osypenko, O. P. Plakhotnyi // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2019. – Vol. 55. – No. 6. – P. 621–629. DOI: [10.3103/S1068375519060073](https://doi.org/10.3103/S1068375519060073). *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в Scopus.*

Здобувачеві належать теоретичні розрахунки кількісних значень силових чинників, що діють на дротяний електрод за ЕЕДВ, які лягли в основу експериментальної частини роботи.

4. Osypenko V. Principles of the express method for controlling interelectrode space condition during wire electrochemical processing / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. // Journal of Electrochemical Science and Engineering. – 2019. – № 9 (4). – P. 269–280. DOI: [10.5599/jese.660](https://doi.org/10.5599/jese.660). *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в WoS-(ESCI).*

Здобувачем запропоновано метод та показано його практичну можливість оперативного контролю стану міжелектродного проміжку за ЕХРО дротяним електродом.

5. Plakhotnyi O. Computer modeling of forming surface by sequential wire electrodischarge-electrochemical machining / Plakhotnyi O., Timchenko O., Osypenko V. // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2353 – P. 744–754. Online: <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper59.pdf>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в Scopus.*

Здобувачем розроблено математичні засади комп'ютерного моделювання процесу формоутворення поверхонь за комбінованою послідовною технологією електроерозійного вирізання та електрохімічної обробки дротяним електродом.

6. Osypenko V. Surface forming features of new combined wire electrical discharge-electrochemical machining technology / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. // Nonconventional Technologies Review. – 2019. – № 23 (2). – P. 52–

57. Online: <http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/223>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в ProQuest, EBSCOhost, DOAJ, Google Scholar, Index Copernicus.*

Здобувачем виявлено закономірності впливу режимів ЕЕДВ та ЕХРО незмінним дротяним електродом на структуру поверхневих шарів та мікрогеометрію поверхонь в обраній групі матеріалів.

7. Determination of microhardness and depth of thermally hardening zone in quality carbon structural steel after WEDM using different discharge parameters / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O., Kondakov A. // Nonconventional Technologies Review. – 2020. – № 24 (3). – P. 31–39. Online: <http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/294>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в ProQuest, EBSCOhost, DOAJ, Google Scholar, Index Copernicus.*

На основі представлених результатів експериментальних досліджень здобувачем встановлено, що домінуючий вплив на формування товщини термічно зміцненого шару має тривалість імпульсу струму.

8. Осипенко В. И. Определение силовых факторов, влияющих на формообразование поверхности при электроэрозионной вырезной обработке / В. И. Осипенко, А. П. Плахотный // Электронная обработка материалов. – 2018. – № 6. – С. 9–18. Online: <http://eom.phys.asm.md/ru/journal/shortview/1674>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в EBSCO, DOAJ.*

Здобувачем проведено обчислювальні експерименти на основі запропонованої розрахунково-експериментальної методики для визначення зовнішнього навантаження, що діє на дріт за електроерозійного різання певних груп сталей та твердих сплавів.

9. Осипенко В. І. Поляризація імпульсним струмом анода з вуглецевої сталі при використанні латунного катода в водному розчині NaCl / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Тімченко О. В. // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. праць (Технічні науки). – 2018. – Вип. 37. – С. 97–105. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в DOAJ,*

Google Scholar, Index Copernicus, OCLC WorldCAT, BASE, SIS, ResearchBib, I2OR, CiteFactor, ESJI, DIIF, PBN.

Здобувачем виявлено закономірності та встановлено рівні вагомості впливу технологічних чинників на динаміку поляризації анода з вуглецевої сталі за використання латунних електродів у водному розчині солі NaCl.

10. Плахотний О. П. Моделювання впливу амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів на процеси анодного розчинення при електрохімічній обробці дротяним електродом / О. П. Плахотний // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2018. – № 3. – С. 87–96. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

11. Плахотний О. П. Підвищення точності розмірної електрохімічної обробки дротяним електродом на основі моделювання тривимірних електростатичних полів / О. П. Плахотний // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2018. – № 1. – С. 60–66. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

12. Осипенко В. І. Оцінка адекватності критеріїв локалізації процесу анодного розчинення при використанні циліндричних дротяних електродів / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Тімченко О. В. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2016. – № 2. – С. 84–91. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

Здобувачем запропоновано статистичний ймовірнісний підхід для наукового обґрунтування нового критерію визначення рівня локалізації процесу електрохімічного розчинення середньовуглецевих сталей за використання схеми обробки з циліндричними дротяними електродами та коаксіальною подачею електроліту.

13. Osypenko V. Modeling of nozzle in jet pump mode for electrical discharge and electrochemical machining / Osypenko V., Plakhotnyi O., Denysenko A. // Technological Complexes. – 2016. – № 1 (13). – P. 40–46. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus, CiteFactor, Google Scholar, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, SIS, ERIH PLUS.*

Здобувачем проведено чисельне моделювання роботи сопла в режимі струменевого насоса в процесі ЕЕДВ та ЕХРО для забезпечення необхідної швидкості потоку рідини коаксіально з дротяним електродом, стабільності та однорідності робочого середовища в зоні обробки.

14. Осипенко В. І. Розрахунок мікрогеометричних параметрів поверхневого шару при електроерозійному дротяному вирізанні повного зйому / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Нестеренко І. М. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2015. – № 3. – С. 95–102. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

Здобувачем отримано основні співвідношення для визначення взаємозв'язку параметрів шорсткості поверхні з геометричними параметрами одиної ерозійної лунки.

15. Osipenko V. I. Improved methodology for calculating the processes of surface anodic dissolution of spark eroded recast layer at electrochemical machining with wire electrode / Osipenko V. I., Plakhotny A. P., Denisenko A. Yu. // Праці Одеського політехнічного університету. – 2014. – Вип. 1 (43). – С. 55–60. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, «Україніка наукова».*

Здобувачем отримано аналітичний розв'язок крайової задачі анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів, що мають нерівномірні по товщині електрохімічні характеристики.

16. Осипенко В. И. Исследование процессов съема материала при электрохимической размерной обработке проволочным электродом / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Билан А. В. // Вісник СевНТУ : зб. наук. праць. – 2011. –

Вип. 118. – С. 107–112. – Серія : Машиноприладобудування та транспорт.
Стаття у фаховому виданні України.

Здобувачем отримано аналітичний розв'язок задачі про розподіл густини струму на поверхні деталі для технологічної схеми EXPO ДЕ.

17. Моделювання та керування впливом поперечної жорсткості д्रोного електрода на точність електроерозійного утворення конічних поверхонь / Поляков С. П., Осипенко В. І., Плахотний О. П., Ступак Д. О., Шитик О. Ю. // Вібрації в техніці та технологіях. – 2007. – № 3 (48). – С. 42–45. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем розвинуто математичну модель форми д्रोного електрода з урахуванням поперечної жорсткості за чотирикоординатного електроерозійного різання.

18. Моделювання теплових процесів руйнації електродів розрядами, характерними для електроерозійного вирізання / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Полонський Л. Г., Степчин А. Я. // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2006. – № 4. – С. 63–70. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем обґрунтовано постановку нелінійної крайової задачі теплопровідності з рухомими границями фаз для умов ЕЕДВ, підібрано ефективний чисельний метод її розв'язку.

19. Модель для розрахунку викривлень дрового електрода при чотирикоординатній електроерозійній обробці / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Роман В. В., Ступак Д. О. // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2003. – № 5. – С. 77–81. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем отримано аналітичний розв'язок задачі про форму д्रोного електрода при поперечному навантаженні, характерному за чотирикоординатного електроерозійного вирізання.

20. Осипенко В. И. Новые технические решения в управлении характеристиками импульсов при электроэрозионной вырезной обработке проволочным электродом / В. И. Осипенко, А. П. Плахотный // Вісник Черкаського державного університету. – 2008. – № 1. – С. 10–14. *Стаття у фаховому виданні України.*

вного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 275–277. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем проведено дослідження процесів формування ерозійної лунки залежно від енергії імпульсів та діаметра каналу іскрового розряду з метою розробки принципово нового генератора коротких імпульсів для ЕЕДВ.

21. Підвищення точності чотирикоординатної електроерозійної обробки складноконтурних деталей / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Ступак Д. О., Цвітохін М. С. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – № 1. – С. 56–60. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем виділено технологічні параметри ЕЕДВ, які суттєво впливають на точність формоутворення при виготовленні складноконтурних деталей.

22. Термоупругая модель внутриэлектродных процессов электроэрозионной технологии / Поляков С. П., Осипенко В. И., Плахотный А. П., Тригуб О. А. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. трудов. – Донецк : ДонГТУ, 2001. – Вып. 17. – С. 168–171. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем обґрунтовано вибір граничних умов, що відображають характерну локальність теплового навантаження на дрітаний електрод в термомружній математичній моделі.

23. Плахотний О. П. Формування твердосплавних різальних елементів фасонного інструменту за допомогою електроерозійної обробки / О. П. Плахотний, С. П. Поляков // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 1998. – № 1. – С. 62–66. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем отримано математичні формули, що лежать в основі розробленої методики проектування процесу формоутворення складнопрофільних деталей різального інструменту за ЕЕДВ.

24. Пристрій для подачі робочої рідини в міжелектродний проміжок : пат. на винахід № 117497 Україна : МПК В23Н 7/36 / В. І. Осипенко, А. Ю. Денисенко, О. П. Плахотний. – № а201603393 ; заявл. 01.04.2016 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15. *Участь у створенні винаходу всіх авторів однакова.*

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

25. Osypenko V. I. Localization criteria of the electrochemical machining process using cylindrical wire electrodes / Osypenko V. I., Plakhotnyi O. P., Timchenko O. V. // Практическое значение современных научных исследований '2019 : сб. тезисов междунар. науч. конф., 8–9 апр. 2019 г. – Одесса, 2019. – С. 5–8.
26. Osypenko V. Features of the single crater geometry formation in wire electrical discharge machining using modern current generators / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : матеріали IX Міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 трав. 2019 р. – Чернігів, 2019. – С. 47–48.
27. Плахотний О. П. Моделирование потока электролита та оцінка його впливу на процеси анодного розчинення при електрохімічній обробці дрітним електродом / О. П. Плахотний, А. Ю. Денисенко // Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences : зб. наук. праць Міжнар. наук.-практ. конф., Dec. 27–28, 2017. – Radom, Republic of Poland, 2017. – С. 130–134.
28. Осипенко В. І. Моделирование работы сопла для технологического комплексу электроерозийной та електрохімічної обробки / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Денисенко А. Ю. // Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів «ТК-2016» : зб. наук. праць IV Міжнар. наук.-техн. конф., 26–28 трав. 2016 р. – Луцьк, 2016. – С. 36.
29. Плахотный А. П. Моделирование процессов разрушения поверхностных слоев инструментальных сталей при электрохимической обработке проволоочным электродом / Плахотный А. П., Осипенко В. И., Билан А. В. // Актуальные проблемы прочности : материалы 51-й междунар. конф., 16-18 мая 2011 г. – Харьков, 2011. – С. 215–216.
30. Автоматизированный электроэрозионный вырезной станок на линейных двигателях с газовой смазкой в направляющих / С. П. Поляков, А. И. Каргодский, В. И. Осипенко, Т. Б. Юхмич, А. П. Плахотный // Аэрокосмический

комплекс: конверсия и технологии : тезисы докл. науч.-техн. конф., 11-14 сент. 1995 г. – Житомир, 1995. – С. 103–104.

31. Плахотный А. П. Электроэрозионная обработка и эксплуатация фасонных фрез / Плахотный А. П., Поляков С. П., Постригань С. П. // Высокоэффективные технологии в машиностроении : материалы конф., 28-30 окт. 1998 г. – Харьков, 1998. – С. 69.

32. Осипенко В. И. Моделирование и управление технологическим процессом 4-х координатной электроэрозионной обработки / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Поляков С. П. // Автоматика – 97 : праці 4-ї Укр. конф. з автоматичного управління, 23-28 черв. 1997 р. – Черкаси, 1997. – Т. V. – С. 70.

33. Осипенко В. И. Математические и технологические аспекты САПР 4-х координатной электроэрозионной обработки / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Поляков С. П. // Оснастка-97 : тезисы докл. науч.-техн. конф., 20-21 марта 1997 г. – К., 1997. – С. 33–35.

34. Осипенко В. И. Исследование прогибов проволочного электрода инструмента и оптимизация стратегии обработки сложноконтурных деталей / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Поляков С. П. // Высокоэффективные технологии в машиностроении : тезисы докл. на Междунар. конф., посвящ. 100-летию КПИ. – Алушта, сентябрь 1996 г.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

35. Осипенко В. І. Розрахунок прогину дрітного електрода при 4-координатній електроерозійній різці / В. І. Осипенко, О. П. Плахотний // Експрес-новини: наука, техніка, виробництво. – 1997. – № 19–20. – С. 17–18.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ANNOTATION	6
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	10
ЗМІСТ	19
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	25
ВСТУП.....	26
РОЗДІЛ 1	37
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ	
ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ВИРІЗНИХ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ РОЗМІРНИХ	
ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ	
1.1 Особливості формування поверхні за дії електричних розрядів при електроерозійній обробці та сутність процесів електрохімічного анодного розчинення.....	37
1.1.1 Аналіз граничних можливостей точності формоутворення, шорсткості поверхні та формування поверхневих шарів за електроерозійного дротяного вирізання.....	37
1.1.2 Технологічні схеми та сучасні показники вихідних параметрів розмірної електрохімічної обробки імпульсним струмом.....	47
1.2 Підвищення ефективності та якості обробки металів при застосуванні гібридних та комбінованих технологій	51
1.2.1 Огляд альтернативних комплексних технологій покращення параметрів поверхні після електроерозійної вирізної обробки	51
1.2.2 Комбінована технологія електроерозійної та електрохімічної обробки.....	52
1.3 Аналіз сучасних методів математичного моделювання технологічних процесів електроерозійного дротяного вирізання та електрохімічної розмірної обробки	56
1.3.1 Моделі електроерозійної вирізної обробки	56
1.3.2 Моделювання процесів електрохімічної розмірної обробки.....	60
1.4 Узагальнення огляду напрямків розвитку досліджень в галузі електроерозійних та електрохімічних технологій, обґрунтування завдань роботи	65

РОЗДІЛ 2	69
ПРИЛАДИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ, ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	69
2.1 Експериментальна база досліджень: стандартні, модифіковані та спеціально розроблені прилади, обладнання, матеріали	69
2.1.1 Загальна схема експериментального комплексу.....	69
2.1.2 Технічні характеристики верстата та параметри імпульсів генераторів технологічного струму електроерозійного вирізного комплексу СЕЛД-02 та електроерозійного комплексу AccuteX GE-43SA.	71
2.1.3 Параметри джерел електричних імпульсів для реалізації потенціостатичних та гальваностатичних режимів електрохімічного анодного розчинення	72
2.1.4 Хімічний склад матеріалу та типи мікроструктур зразків, що використовувались у дослідженнях	73
2.1.5 Модернізована система подачі робочих рідин в зону обробки для реалізації комбінованої технології.....	74
2.1.6 Електрохімічні комірки для досліджень закономірностей анодного розчинення зразків	79
2.1.7 Методики та обладнання для контролю електропровідності та температури електролітів.....	82
2.1.8 Обладнання, прилади та методики реєстрації параметрів поверхні, отриманої електроерозійним та електрохімічним способами.....	85
2.2 Розрахунково-експериментальні методики досліджень.....	95
2.2.1 Методика визначення реальної форми дрітного електрода внаслідок дії електричних розрядів та гідродинамічних сил.....	95
2.2.2 Методика моніторингу стану міжелектродного проміжку шляхом математичної обробки осцилограм напруга – струм	100
2.3 Математичні методи та моделі, використані в дослідженнях	110
2.3.1 Математична тривимірна модель теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв’язку трифазної задачі теплопровідності	110
2.3.2 Математична модель розподілу електростатичних полів між циліндричним катодом і плоским анодом на основі теорії функцій комплексного змінного	117

2.3.3	Математична тривимірна модель розподілу електростатичних полів для технологічної схеми дротяний катод – складноконтурний анод	121
2.3.4	Математична модель анодного електрохімічного розчинення на основі чисельного розв’язку крайової задачі з рухомими границями	127
2.3.5	Математична модель поля швидкостей потоку електроліту в МЕП, характерних для комбінованої електроерозійної і електрохімічної обробки дротяним електродом	130
2.3.6	Математична модель вибору ефективної тривалості імпульсу струму для електрохімічного розчинення на основі аналітичного розв’язку нестационарного рівняння дифузії	134
	Висновки за розділом 2	140
РОЗДІЛ 3	143
	ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ РУЙНАЦІЇ ТА ФОРМУВАННЯ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ЕЛЕКТРОДІВ РОЗРЯДАМИ МАЛОЇ ТРИВАЛОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ.....	143
3.1	Аналіз процесів руйнування металів розрядами з енергією та тривалістю, характерними для електроерозійного дротяного вирізання...	143
3.2	Математичне моделювання теплофізичної дії одиничного розряду на поверхню анода	151
3.2.1	Обґрунтування прийнятих припущень та межі застосування математичного моделювання за умов ЕЕДВ	151
3.2.2	Встановлення просторово-енергетичних характеристик джерела тепла	155
3.2.3	Чисельне моделювання впливу параметрів іскрового розряду на формування ерозійної лунки	168
3.3	Глибина зони структурних змін у поверхневих шарах обробленої поверхні як функція тривалості та густини потужності в каналі розряду.	181
3.4	Концепція та методика прогнозування мікрогеометричних параметрів поверхонь при електроерозійному дротяному вирізанні.....	194
3.5	Результати експериментальних досліджень мікрогеометричних параметрів поверхонь при електроерозійному дротяному вирізанні та оцінювання рівня адекватності розробленої методики розрахунку	199
	Висновки за розділом 3	201

РОЗДІЛ 4	203
ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПРИПОВЕРХНЕВОГО АНОДНОГО РОЗЧИНЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНІЙ ОБРОБЦІ МІКРОСЕКУНДНИМИ ІМПУЛЬСАМИ СТРУМУ	203
4.1 Експериментальні та теоретичні дослідження впливу гідродинаміки потоку електроліту на процеси анодного розчинення	204
4.1.1 Результати експериментальних досліджень діапазону швидкостей потоку електроліту у взаємозв'язку з амплітудно-часовими параметрами електричних імпульсів при використанні електрохімічної комірки з відцентровою подачею електроліту	205
4.1.2 Обґрунтування вибору амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів за експериментами з плоскопаралельним потоком електроліту	214
4.2 Вплив термообробки на електрохімічне розчинення сталей в активуючому електроліті NaCl за використання імпульсного струму	220
4.2.1 Результати експериментальних досліджень залежності виходу за струмом від попередньої термообробки і хімічного складу матеріалу зразків в умовах різної густини струму	221
4.2.2 Результати аналізу чинників та механізмів електрохімічного розчинення термооброблених сталевих зразків.....	226
4.3 Особливості процесів електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом-інструментом	234
4.3.1 Обґрунтування інформативного критерію локалізації процесу анодного розчинення при використанні циліндричних дротяних електродів	235
4.3.2 Розробка технологічної схеми подачі електроліту для електрохімічної обробки дротяним електродом і дослідження її ефективності	248
4.3.3 Обґрунтування вибору амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів для ефективної електрохімічної обробки дротяним електродом	264
4.3.4 Експериментально-теоретичні дослідження коефіцієнта електрохімічного розчинення електроерозійно модифікованих поверхневих шарів і його зміни вглиб матеріалу за ЕХОДЕ	277

4.3.5 Результати дослідження хімічного складу поверхневих шарів сталі X12Ф1 після ЕЕВО та ЕХРО	283
Висновки за розділом 4	285
РОЗДІЛ 5	289
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СКЛАДНОКОНТУРНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗА КОМБІНОВАНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ	289
5.1 Оцінювання природи та параметрів силового навантаження, що діє на дротяний електрод у процесі обробки та призводить до його прогину	290
5.2 Комп'ютерне моделювання тривимірного розподілу густини струму по поверхні анода при використанні циліндричних електродів	301
5.3 Конструктивні та технологічні методи підвищення точності формоутворення за розмірної електрохімічної обробки дротяним електродом	305
5.4 Формоутворення циліндричних поверхонь за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом	307
5.4.1 Комп'ютерне моделювання та експериментальна верифікація геометрії циліндричних поверхонь на етапі електроерозійного дротяного вирізання	307
5.4.2 Засади проектування технологічного процесу електрохімічної розмірної обробки для усунення похибок електроерозійного вирізання циліндричних поверхонь	312
5.5 Формоутворення поверхні кутів за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом	317
5.5.1 Комп'ютерне моделювання геометрії зовнішніх кутів на етапі електроерозійного дротяного вирізання	317
5.5.2 Засади проектування технологічного процесу електрохімічної розмірної обробки для усунення похибок електроерозійного вирізання поверхонь зовнішніх кутів	320
Висновки за розділом 5	329

РОЗДІЛ 6	330
6.1 Загальна структурна схема системи автоматизованого проектування технологічних процесів за комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.....	330
6.1.1 Технічні вимоги до асортименту деталей та характеристики обладнання.....	332
6.1.2 Стадія технологічного процесу електроерозійного дротяного вирізання.....	335
6.1.3 Стадія технологічного процесу електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом	336
6.2 Взаємодія основних блоків інтегрованої САПР ТП на прикладі проектування технологічного процесу виготовлення прецизійних деталей магнітної оптики	344
6.3 Практичне застосування та впровадження результатів досліджень .	351
Висновки за розділом 6	352
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	354
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	354
ДОДАТКИ.....	384
Додаток А. Акти впровадження наукових результатів у виробництво.....	384
Додаток Б. Патент на винахід.	389
Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	394

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- CAD – computer aided design (система автоматизованого проектування);
- CAE – computer aided engineering (програмний пакет для інженерних розрахунків);
- CFD – computational fluid dynamics (обчислювальна гідродинаміка);
- АмПАР – амфолітна поверхнево-активна речовина;
- АЧПДЖ – амплітудно-часові параметри джерела живлення;
- ВПД – верстат – пристосування – інструмент – деталь;
- ВР ПАР – водний розчин поверхнево-активних речовин;
- ГКІ – генератор коротких імпульсів;
- ДЕІ – дротяний електрод-інструмент;
- ЕЕВВ – електроерозійний вирізний верстат;
- ЕЕВО ДЕ – електроерозійна вирізна обробка дротяним електродом;
- ЕЕДВ – електроерозійне дротяне вирізання;
- ЕЕО – електроерозійна обробка;
- ЕХО – електрохімічна обробка;
- ЕХО ДЕ – електрохімічна обробка дротяним електродом;
- ЕХРО – електрохімічна розмірна обробка;
- ЕХРО ДЕ – електрохімічна розмірна обробка дротяним електродом;
- МЕП – міжелектродний проміжок;
- МСЕ – метод скінчених елементів;
- ПАР – поверхнево-активна речовина;
- РР – робоча рідина;
- СЕМ – сканувальний електронний мікроскоп
- СЧПК – система числового програмного керування;
- ТЕМ – трансмісійний електронний мікроскоп.

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасне машинобудування висуває жорсткі вимоги до параметрів якості і надійності продукції, що випускається. Необхідно підвищувати міцність і експлуатаційні характеристики виробів та створювати механізми, що мають малі габарити за більш високих функціональних можливостей. Одним із шляхів вирішення поставлених завдань стало використання високоміцних та температурно-стійких матеріалів при виробництві деталей машин і механізмів. Попит на макро- та мікрокомпоненти з таких матеріалів швидко збільшується в автомобільній, аерокосмічній, електронній, оборонній промисловості та в галузі медицини. Незважаючи на переваги використання цих матеріалів, їх обробка на лезових металообробних верстатах створює багато труднощів і найчастіше є неможливою. Адекватним рішенням даної проблеми є застосування електрофізичних та електрохімічних методів розмірної обробки матеріалів. Одним з таких методів є електроерозійне дротяне вирізання (ЕЕДВ). В наш час воно стало одним із найпоширеніших методів високоефективної обробки завдяки своїм унікальним можливостям прецизійної обробки твердих та надтвердих струмопровідних матеріалів.

Європейські дослідники, що працюють над розвитком нового покоління верстатів ЕЕДВ, зазначають, що глобалізація ринків спричинила новий сценарій, в якому конкурентоспроможність є ключовим словом [Sanchez et al 2012]. Сучасний контекст у верстатобудівній галузі характеризується високою швидкістю зміни як вимог, що пред'являються об'єктивними ринками, так і технологічним прогресом конкурентів, головним чином з країн Далекого Сходу. Лише кілька років тому конкуренти з країн, що розвиваються, базували свою позицію на ринку на своїй низькій зарплаті. Ситуація зараз явно змінюється, оскільки ці країни також розробляють власну технологію, що зайняла важливу частину ринку, який раніше охоплювали європейські країни. Якщо протягом останнього десятиліття шорсткість поверхні після ЕЕДВ на рівні $Ra\ 0,4\ \mu\text{m}$ давала доступ на ринок Китаю, то зараз цього не-

достатньо. Найбільші компанії, виробники обладнання для ЕЕДВ мають у своїх каталогах машини, які досягають чистоти поверхні до Ra 0,2 мкм. Як висновок, розробники констатують, що виникає нове актуальне “вікно” вихідних параметрів, розміщене між показниками мікро ЕЕДВ та звичайним ЕЕДВ. Це вікно охоплює діапазон в десятих долях мікрона шорсткості поверхні і допуску в розмірах явно нижче 10 мкм.

Ключовим питанням є технологічний спосіб, в який точність виготовлення та чистота поверхні досягається. Застосування надмірної кількості електроерозійних проходів, використання дороговартісних емульсій у якості робочої рідини зазнають економічного тиску від вимог скорочення часу циклів виготовлення виробу та зниження витрат.

Вирішенню проблеми сприяють наукові дослідження. За останні роки у літературі з'явився ряд науково-дослідницьких робіт, пов'язаних з точністю обробки та цілісністю поверхні за ЕЕДВ. Автори відмічають, що критичними питанням розвитку технології ЕЕДВ у цьому напрямку є деформація нежорсткого дротяного електрода, яка негативно впливає на точність деталі, що обробляється, та наявність зони термічного впливу, спричиненої іскровими розрядами.

Враховуючи наведене, було запропоновано новий підхід до розвитку технологій ЕЕДВ, який полягає в застосуванні нетермічної технології розмірної електрохімічної обробки (ЕХРО) послідовно після ЕЕДВ незмінним дротяним електродом на тому ж верстаті за одну установку заготовки. За відсутності поперечних сил дротяний електрод залишається недеформованим і шляхом керованого анодного розчинення знімається поверхневий термічнозмінений шар.

Завдяки роботам таких вчених, як М. Datta, D. Landolt (Швейцарія), К. Р. Rajurkar, D. Zhu, М. М. Sundaram А. Р. Malshe (США), J. А. McGeough, А. De Silva (Велика Британія), М. М. Lohrengel, С. Rosenkranz, F. Klocke, А. Klink, Н. Р. Schulze (Германія), J. Kozak, А. Ruszaj, S. Skoczypiec (Польща), А. Давыдов, В. Волгин, В. Любимов, С. И. Галанин, В. П. Житников, А. Н. Зай-

цев (Росія), B. Bhattacharyya, J. Munda, S. Debnath, J. Kundu (Індія), N. S. Qu, Y. B. Zeng, K. Xu, X. Fang, L. Meng, H. He (Китай), T. Masuzawa, M. Kunieda, W. Natsu (Японія) та інших, встановлені основні закономірності електрохімічного анодного розчинення металів і доведено переваги використання імпульсного струму за ЕХРО, який дає більш широкий спектр можливостей. Відома імпульсна електрохімічна обробка поверхневого фінішування (PECF – Pulse Electrochemical Finishing) – це нова технологія чистової обробки, працює на значно нижчій середній щільності струму порівняно з традиційною ЕХО в електролітах водного розчину нейтральних солей. Однак щільність струму і, відповідно, продуктивність розчинення в процесах зниження шорсткості поверхні цієї технології вища, ніж за технології імпульсного електрохімічного полірування, в якій використовуються кислі або лужні електроліти, що можуть пошкодити виробниче обладнання і порушувати екологічні вимоги.

Для реалізації промислового впровадження новітньої комбінованої технології ЕЕДВ та ЕХРО незмінним дріт'яним електродом потрібна подальша науково-дослідна діяльність по розвитку і вдосконаленню аналітичних та чисельних математичних моделей для більш точного кількісного опису багато-параметричних процесів як електроерозійного руйнування, так і анодного розчинення з метою повного використання можливостей комбінованої технології. Застосування відносно тонких циліндричних дріт'яних електродів дає можливість локально діяти на поверхню аноду завдяки суттєво сконцентрованому розподілу щільності струму. Підвищенню точності і продуктивності вирівнювання поверхні сприяє зменшення міжелектродного проміжку, який може бути строго витриманий вздовж всієї траєкторії обробки завдяки прецизійним приводам електроерозійного верстату. Основним обмежуючим чинником є розподіл швидкостей потоку електроліту в міжелектродному проміжку і його вплив на процеси масопереносу, які для такої технологічної схеми недостатньо промодельовані і досліджені. Невивченими досьогодні

залишаються закономірності електрохімічного розчинення електроерозійно змінених поверхневих шарів.

Таким чином в основу даної дисертаційної роботи покладено концепцію, сутність якої полягає в проведенні комплексних системних досліджень для подальшого розвитку і вдосконалення аналітичних та чисельних математичних моделей базових процесів електроерозійного руйнування і анодного розчинення при використанні циліндричних дротяних електродів. Отримане коректне математичне описання обох технологій є науково-технологічним підґрунтям розробки методології багатофакторного розрахунку характеристик обладнання та параметрів режимів обробки, які забезпечують технологічну сумісність і максимальну ефективність керованого формування поверхонь з заданими геометричними, мікрогеометричними та фізико-хімічними параметрами шляхом послідовних ЕЕДВ та ЕХРО в одній технологічній установці, незмінним ДЕІ без переустановки деталі. Реалізація запропонованої концепції є важливим кроком до промислового впровадження новітньої комбінованої технології та обумовлює актуальність роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано у Черкаському державному технологічному університеті на кафедрі енерготехнологій в рамках держбюджетних тем «Розробка прогресивних технологій виготовлення деталей з використанням систем автоматизованого контролю» (номер державної реєстрації № 0100V004420), «Створення наукових та фізико-технологічних основ оптимізації імпульсної електроерозійної обробки» (номер державної реєстрації № 01030003687), «Наукові основи створення фізичних моделей формування мікрогеометрії та фізико-хімічних властивостей поверхні чотирикоординатним електроерозійним дротяним вирізанням» (номер державної реєстрації № 0106U004493), «Фізико-технологічні основи керування якістю поверхні при комбінованій дротяній електроерозійній та електрохімічній обробці» (номер державної реєстрації № 011U006177).

Мета роботи полягає в подальшому розвитку науково-технологічних засад комбінованої дротяної електроерозійної та електрохімічної обробки, створенні системи багатфакторного розрахунку параметрів обладнання і технологій для досягнення максимальних технологічних характеристик процесу та отримання можливості керованого формування поверхонь з новими заданими геометричними і фізико-хімічними параметрами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз сучасного стану та напрямків розвитку електроерозійних вирізних та електрохімічних розмірних технологій обробки матеріалів.

2. Створити методологію, підібрати прилади та розробити обладнання для дослідження і моделювання фізичних, хімічних, механічних, електричних, гідродинамічних процесів в МЕП та визначення параметрів поверхонь, модифікованих електроерозійним та електрохімічним способами.

3. Створити комплекс математичних моделей для дослідження процесів та багатфакторного розрахунку параметрів обладнання та технологій ЕЕДВ та ЕХРО ДЕ.

4. Використовуючи математичне моделювання та результати експериментальних досліджень, отримати, проаналізувати та узагальнити дані про закономірності формування геометрії одиничної лунки в зоні взаємодії плазми каналу іскрового розряду з матеріалом заготовки, мікрогеометрії та зони термічного впливу в поверхневих шарах сталей, утворених розрядами, характерними для електроерозійного дротяного вирізання.

5. Встановити закономірності впливу попередньої термообробки сталей на процеси анодного розчинення за ЕХРО імпульсним струмом.

6. Провести комплексні теоретичні та експериментальні дослідження впливу складу електроліту, гідравлічних характеристик потоку промивання МЕП, складу та структури поверхневих шарів досліджуваних сталей, електричних параметрів джерела живлення, величини МЕП на закономірності анодного розчинення приповерхневих шарів вуглецевих та легованих сталей.

7. Використовуючи розроблені розрахунково-експериментальні методики, дослідити та проаналізувати особливості похибок формоутворення при електроерозійному дротяному вирізанні.

8. Спираючись на результати теоретичних та експериментальних досліджень, запропонувати та експериментально апробувати методологію проектування технологічних процесів формування елементів складноконтурних поверхонь вуглецевих та легованих сталей з заданою точністю за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

9. Сформувати базові засади ефективного функціонування системи автоматизованого проектування та вдосконалення технологічних процесів комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом, орієнтованої на визначення областей максимальних характеристик комбінованої технології.

Об'єкт дослідження – процеси комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки незмінним дротяним електродом.

Предмет досліджень – закономірності фізичних, хімічних, гідродинамічних та механічних процесів в міжелектродному проміжку та їх вплив на параметри формоутворення (продуктивність, точність, мікрогеометрія, структура та хімічний склад поверхневих шарів) при комбінованій електроерозійній та електрохімічній обробці сплавів на основі заліза незмінним дротяним електродом.

Методи дослідження. Як теоретична база при постановці та конкретно-му вирішенні поставлених завдань використовуються основні положення теорії іскрового розряду, теорії розмірної електрохімічної обробки металів і сплавів, гідродинаміки, теорії теплопровідності (нестационарні процеси), математичне моделювання з використанням CFD та CAE методів, математичні методи аналізу та обробки результатів експерименту. Експерименти виконувалися на спеціалізованому комплексі для дослідження базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом з використанням сучасної реєструючої та вимірювальної апаратури.

Наукова новизна дисертаційного дослідження. В дисертаційній роботі проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень з подальшого розвитку наукових засад процесів комбінованої дротяної електроерозійної та електрохімічної обробки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

- Вперше отримано рівняння для розрахунку просторово-енергетичних характеристик джерела тепла в зоні взаємодії плазми каналу іскрового розряду з матеріалом заготовки для імпульсів технологічного струму, характерних для сучасних генераторів ЕЕДВ.

- Вперше отримано рівняння, що адекватно описують процес розширення каналу короткого іскрового розряду в середовищі водопровідної води з питомою електропровідністю 40 мкСм/см та водному розчині амфолітних поверхнево-активних речовин (АмПАР) з концентрацією 0,05%.

- Вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено закономірності впливу просторово-енергетичних (густина потужності в електродній плямі, діаметр електродної плями, тривалість імпульсу) параметрів розряду та теплофізичних характеристик оброблюваного матеріалу на формування теплових полів, що визначають як процеси випаровування і плавлення матеріалу заготовки так і формування зони структурних змін у поверхневих шарах обробленої поверхні. Доведено, що розрахунковим підбором тривалості та амплітуди електричних імпульсів генератора технологічного струму можливо сформувати джерело тепла, яке здатне збільшити на 15-40% видалення розплавленого матеріалу з ерозійної лунки та забезпечити керування формування глибини зони термічного впливу.

- Вперше з використанням методології розрахунку геометрії одиничної ерозійної лунки за тривимірною моделлю теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трифазної задачі теплопровідності отримано рівняння для прогнозування параметрів шорсткості поверхонь у технологічних процесах ЕЕДВ.

- Вперше запропоновано й обґрунтовано використання в якості критеріїв оцінки локалізації процесу анодного розчинення при реалізації технологій ЕХРО ДЕ величини зони розчинення та ексцесів (E_s) розподілу густини

струму й активності розчинення по поверхні анода. Доведена ефективність застосування отриманих формалізованих критеріїв для підвищення точності формоутворення поверхні складноконтурних деталей.

– Шляхом математичного моделювання вперше встановлено та експериментально підтверджено закономірності розподілу густини струму на верхній і передній гранях анода для конфігурації плоский анод – циліндричний катод за умов ЕХРО ДЕ.

– Уточнено закономірності впливу на локалізацію процесу ЕХРО ДЕ величини МЕР та обмежуючі значення максимально допустимої місцевої густини струму, підведеної до одиниці об'єму електроліту, у взаємозв'язку зі швидкістю його оновлення.

– Уточнено величини коефіцієнтів виходу за струмом залежно від густини імпульсного струму та структури, утвореної попередньою термічною обробкою матеріалу при електрохімічному розчиненні сталей У8А, ШХ15, Х12Ф1, Сталь 45.

– Набули подальшого розвитку уявлення про механізми анодного розчинення сталей з різними гомогенними та гетерогенними структурами. Встановлено, що відповідна термічна обробка може видалити всі макроскопічні сегментації карбиду, а потім встановити тонкозернисту мікроструктуру. Однорідна мікроструктура приводить до мікроскопічно рівних поверхонь сталевих субстратів після електрохімічного розчинення металу, застосовуючи високі швидкості потоку електролітів (2–5 м/с) і високу густину струму (до 100 А/см²).

Практичне значення отриманих результатів. У ході виконання дисертаційної роботи запропонована та реалізована загальна апаратна схема експериментального комплексу для дослідження базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом за умов, близьких до практичної реалізації конкретних завдань новітньої комбінованої технології послідовного застосування електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

На основі розрахункових та експериментальних досліджень запропоновано та реалізовано конструкцію сопла, яке забезпечує необхідні гідроди-

намічні характеристики подачі струменя робочої рідини в зону обробки при послідовних технологіях ЕЕВОДЕ та ЕХРОДЕ. Запатентовано (патент на винахід UA 117497 C2) конструкційне рішення з додатковим каналом розрахованого поперечного перерізу, що повністю усуває інжекцію повітря і стабілізує вихідний струмінь. Розроблені та реалізовані конструкції модельних осередків для експериментальних досліджень впливу гідродинаміки потоку на процеси анодного розчинення зразків. Розроблені оригінальні розрахунково-експериментальні методики досліджень:

- визначення реальної форми дротяного електроду внаслідок дії електричних розрядів та гідродинамічних сил;
- моніторингу стану міжелектродного проміжку через математичну обробку осцилограм напруга – струм.

Запропоновано технологічний прийом з використанням ізоляторів на ДЕІ, який при застосуванні разом з математичним апаратом розрахунку електростатичних полів зменшує величину зони нерівномірності розподілу густини струму на гранях заготовки і, відповідно, припуск на усунення зон підвищеного електрохімічного розчинення.

Розроблена САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дротяним електродом пройшла успішну апробацію при проектуванні технологічних процесів виготовлення полюсів квадрупольних лінз для іонних мікроскопів. Результати досліджень впроваджено у виробничих процесах підприємств: ТОВ «Черкасиелеватормаш», ДП НВК «Фотоприлад», м. Черкаси, ЗАТ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Прогрес», м. Запоріжжя, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі внесок автора полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи; формулюванні мети і завдань дослідження; визначенні підходів до опису електричних, електрохімічних, гідродинамічних, теплових та механічних процесів у МЕП [1, 3, 8, 12, 14, 15, 18, 20]; створенні оригінальних розрахунково-експериментальних методик досліджень [2, 4, 9, 17, 23]; розробці комплексу математичних моделей з використанням CFD і CAE методів для досліджень та розрахунків параметрів базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом [3, 5, 10, 11, 13], а саме:

- математична тривимірна модель теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трифазної задачі теплопровідності;
- математична модель розподілу електростатичних полів між циліндричним катодом і плоским анодом на основі теорії функцій комплексного змінного;
- математична тривимірна модель розподілу електростатичних полів для технологічної схеми дротяний катод – складноконтурний анод;
- математична модель анодного електрохімічного розчинення на основі чисельного розв'язку крайової задачі з рухомими границями;
- математична модель вибору ефективної тривалості імпульсу струму для електрохімічного розчинення на основі аналітичного розв'язку нестационарного рівняння дифузії;
- математична модель поля швидкостей потоку електроліту в МЕП, характерних для комбінованої електроерозійної і електрохімічної обробки дротяним електродом.

Автору належать загальні висновки дисертаційної роботи і такі основні положення, що захищаються:

1. Встановленні фізико-технологічні закономірності процесів утворення каналу розряду і джерела тепла на поверхні електродів, електроерозійної руйнації та формування мікрогеометрії і структури приповерхневих шарів електродів розрядами малої тривалості та енергії, характерними для сучасних ЕЕДВ.

2. Результати комплексу теоретичних та експериментальних досліджень процесів приповерхневого анодного розчинення при електрохімічній обробці мікросекундними імпульсами струму.

3. Наукові засади методів забезпечення точності формоутворення елементів складноконтурних поверхонь за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

Загальний план роботи, програму досліджень, інтерпретацію і узагальнення отриманих результатів, роботи по їх впровадженню у виробництво виконано разом з науковим консультантом д.т.н. В. І. Осипенком.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні наукові положення дисертації доповідалися на таких всеукраїнських та міжнародних кон-

ференціях: Международная научная конференция «Практическое значение современных научных исследований '2019» (м. Одеса, 2019); IX Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2019); Міжнародна науково-практична конференції «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences» (Radom, Republic of Poland, 2017); IV Міжнародна науково-технічна конференція ТК-2016 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» (м. Луцьк, 2016); 51-я международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (м. Харків, 2011); Научно-техническая конференция "Аэрокосмический комплекс: конверсия и технологии" (м. Житомир, 1995); Конференция "Высокоэффективные технологии в машиностроении" (м. Харків, 1998); 4-та Українська конференція з автоматичного управління "Автоматика - 97" (м. Черкаси, 1997); Научно-техническая конференция "Оснастка-97" (м. Київ, 1997); Международная конференция, посвященная 100-летию КПИ, "Высокоэффективные технологии в машиностроении" (м. Алушта, 1996).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 35 праць, у тому числі 1 монографія, 22 статті у наукових фахових виданнях (з них 3 – у фахових іноземних виданнях, що індексуються в Scopus, 1 – у фаховому іноземному виданні, що індексується в Web of Science, 7 – у наукових фахових виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз даних, 3 – у фахових виданнях іноземних держав, які включено до міжнародних наукометричних баз даних, 2 – одноосібні), 1 патент України на винахід, 10 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 1 стаття в іншому виданні.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 244 найменувань і 3 додатків. Дисертація викладена на 401 сторінці, з них обсяг основного тексту – 322 сторінки, містить 166 рисунків та 19 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ВИРІЗНИХ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ РОЗМІРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Особливості формування поверхні за дії електричних розрядів при електроерозійній обробці та сутність процесів електрохімічного анодного розчинення

1.1.1 Аналіз граничних можливостей точності формоутворення, шорсткості поверхні та формування поверхневих шарів за електроерозійного дробного вирізання

Сучасні показники технологічних параметрів електроерозійної вирізної обробки формувались протягом всього еволюційного її розвитку, як технології.



Рисунок 1.1 – Подружжя Борис Романович та Наталя Іоасафівна Лазаренки.

В 1943 році Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренко вперше запропонували метод інверсії металевої ерозії, тобто перевернути ефект видалення металу з електричних вимикачів і максимально використовувати його для обробки металів. Фактично це було винайдення методу електроерозійної обробки.

У перші роки розробки та під час пошуку застосування методу використовували генератори релаксаційного типу за використання конденсаторів

для накопичення та виділення при пробі дозованої енергії розряду. Пауза між розрядами була дуже тривалою, і пробій виникав від ефектів іонізації в зазорі через високу напруженість між електродами.

З точки зору фізики навіть на сьогодні важко визначити різницю між електричними іскрами та дугами. Однак за практичного застосування електророзрядної обробки було знайдено чітку розбіжність. «Іскрова» обробка потрібна для керованої, точної та якісної роботи, тоді як «дугова» характеризує погіршену обробку, що призводить до концентрації розряду, плавлення та перегріву на поверхневих плямах [157]. Крім різниці в теоріях іскрового пробою, існують також відмінності щодо розуміння процесу видалення матеріалу, який обумовлений термічними ударами та механічними напруженнями матеріалів деталі та електрода.

На початку 1960-х років, з появою напівпровідникових перемикачів статичних імпульсних генераторів стали застосовуватися короткі іскрові розряди і почався розвиток електроерозійної вирізної обробки дрітним електродом.

На кінець 1960-х років з'явилися перші серійні ЕЕВО верстати – AGIEcut DEM15.

В кінці 1970-х років розроблені системи цифрового контролю з ЧПК, які значно розширили сферу застосування електроерозійних вирізних верстатів і значно прискорили їх розвиток.

В період 1980-1990 років відбувалася розробка генераторів коротких імпульсів, по завершенні якої досягнута максимальна продуктивність електроерозійної вирізної технології – 300 мм²/хв. на інструментальній сталі, 750 мм²/хв. за обробки алюмінію [131].

Важливим прогресивним рішенням (1998-2008 рр.) було застосування розробниками компанії Sodick лінійних двигунів в якості приводів електроерозійних вирізних верстатів, що значно підвищило точність виготовлення деталей і стабільність технологічного процесу.

На теперішній час залишаються актуальними проблеми підвищення якості поверхні ЕЕВО, точності формоутворення нежорстким дротяним електродом.

Результати досліджень та розробки по цим проблемам лягають в основу сучасних комерційних промислових систем управління технологічним процесом ЕЕВО, якими комплектуються електроерозійне обладнання світових виробників.

Промислові адаптивні системи управління технологічним процесом ЕЕВО:

- адаптивний контроль AI (штучний інтелект), розроблений компанією Fanuc,
- експертна система ерозії від ONA Electroerosión,
- AutoMagic від Mitsubishi Electric,
- Pilot Expert 3 від Agie-Charmillies,
- SODICK Fine Corner Control (система контролю точності формоутворення деталі при обході кутів).

Це дороговартісні системи, в яких закриті алгоритми управління технологічним процесом і вибір параметрів ЕЕВО. Для ефективного використання електроерозійного обладнання, придбаного у інших виробників, і комплектації технологічними інструкціями електроерозійних верстатів вітчизняного виробництва необхідний розвиток наукових засад фізичних процесів, що лежать в основі електроерозійного руйнування матеріалу, та розробки технологічних процесів формування заданих властивостей поверхні та поліпшення точності формоутворення за електроерозійної вирізної обробки.

Мінімізація шорсткості поверхні суто за рахунок вибору амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів, на сьогодні, добре вивчений підхід [131]. Y. Suziki та M. Kishi [170] вивчали зменшення енергії розряду для отримання кращої шорсткості поверхні, тоді як Y.F. Luo [99-101] виявив додаткову потребу у високоенергетичній ефективності для підтримки високої швидкості обробки, не пошкоджуючи дріт. Швидкість різання та шорсткість

поверхні мають взаємно обернену залежність [41]. За різними дослідженнями, тривалість імпульсу є найбільш значущим фактором, який впливає на шорсткість поверхні. Зі збільшенням тривалості імпульсу збільшується шорсткість поверхні через частіше виникнення "подвійного іскроутворення". Подвійне іскріння забезпечує погану обробку поверхні. Ці результати узгоджуються з тими, про які повідомили Sarkar S. та ін. [152]; Kanlayasiri K. та Boonmung S. [69, 70] та Kumar A. та ін. [85]. Tosun N. та ін. [180] досліджували вплив параметрів різання на розміри ерозійних кратерів (діаметр та глибина) на дротяному електроді. Дослідження кратерів дротяних електродів має вирішальне значення для розуміння розриву дроту, величини прогину дротяного електроду та шорсткості поверхні заготовки. Більші розміри кратерів на дроті збільшують ризик розриву дроту, а також призводять до поганої якості поверхні деталі та точності обробки. Виявлено, що збільшення тривалості імпульсу, напруги в розімкнутому ланцюзі та швидкості перемотування дроту збільшують розмір кратера.

Багато дослідників розглядають характеристику поверхні після ЕЕВО використовуючи термін «цілісність поверхні» (surface integrity). Для покращення цілісності поверхні слід враховувати такі фактори, як шорсткість поверхні, товщина білого шару та поверхневі тріщини (рисунок 1.2). Високоякісний стан поверхні може підвищити втомну міцність, стійкість до корозії та зносостійкість деталі [98]. Kuriakose S. та Shunmugam M. [91] досліджували вплив різних параметрів на характеристики поверхні. Спостерігається, що більш рівномірні характеристики поверхні отримують за використання електроду з покриттям. Крім того, було встановлено, що час паузи між імпульсами є найбільш чутливим параметром, який впливає на утворення шару, що складається з суміші оксидів. Також було виявлено, що такі параметри, як час паузи між імпульсами, тривалість імпульсу, тиск промивки, швидкість перемотування та натяг дроту, з металургійної точки зору визначаються як важливі параметри процесу ЕЕВО. Newton T. R. та ін. [120] вивчали вплив параметрів технологічного процесу на формування та характеристики повер-

хневого переплавленого шару, і в процесі досліджень було встановлено, що пікові значення сили струму та тривалість імпульсів є рушійними чинниками для визначення середньої товщини переплавленого шару. Час паузи між імпульсами та діаметр дроту не мають суттєвого впливу на середню товщину переплавленого шару.

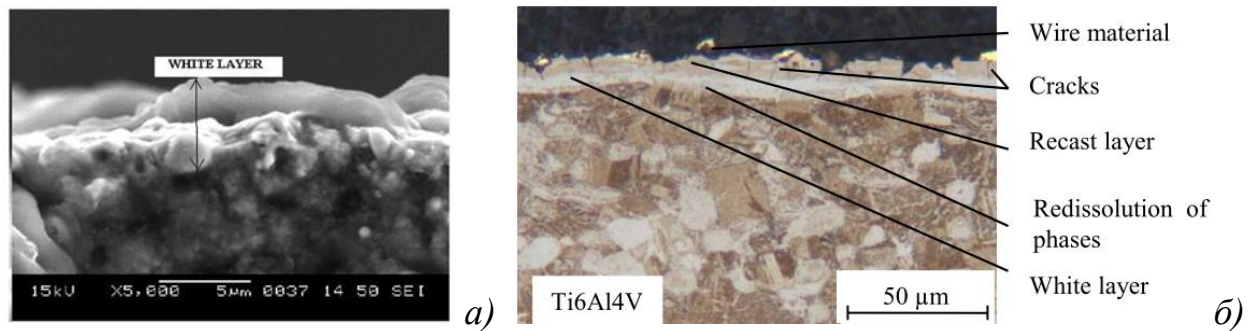
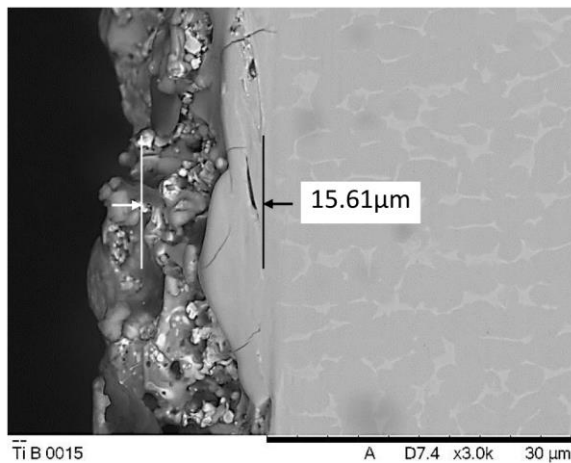
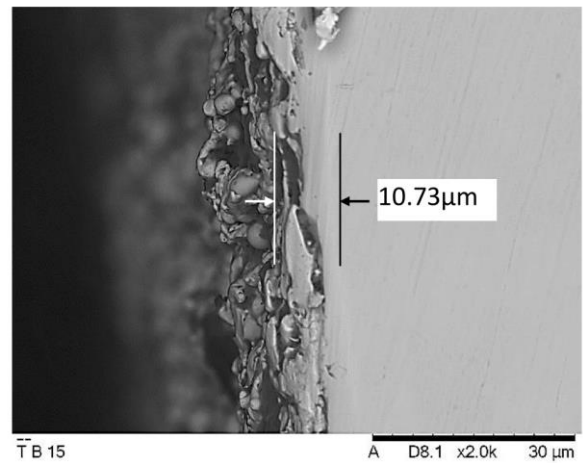


Рисунок 1.2 – Морфологія приповерхневих шарів після ЕЕВО: а) – інструментальна сталь AISI D2 [33], б) – Ti6Al4V [78].

Теплопровідність робочого металу відіграє важливу роль для цілісності поверхні за ЕЕВО [103]. Метали з високою теплопровідністю зазвичай дають меншу товщину білого шару і менше мікротріщин, ніж матеріал з нижчою теплопровідністю. Це пояснюється більш швидким розсіюванням енергії по поверхні матеріалів з високою теплопровідністю. Експериментальні дані свідчать, що матеріал із вуглецевої сталі AISI 1050 має тонший білий шар із меншими тріщинами завдяки високій теплопровідності та пластичності у порівнянні з титановим сплавом Ti6Al4V, як показано на рисунках 1.3 та 1.4. Обидва зразки отримані за однакових умов обробки: амплітуда струму $IP = 17\text{A}$, тривалість імпульсу $T_{on} = 0,3\text{ мкс}$, тривалість паузи $T_{off} = 1,3\text{ мкс}$, швидкість перемотування дроту $WS = 7\text{ м/хв}$, натяг дроту $WT = 3,5\text{ Н}$, з використанням латунного дроту в якості електрода. Товщина білого шару на поверхні Ti6Al4V становить $15,61\text{ мкм}$, а вуглецевої сталі AISI 1050 – $10,73\text{ мкм}$.



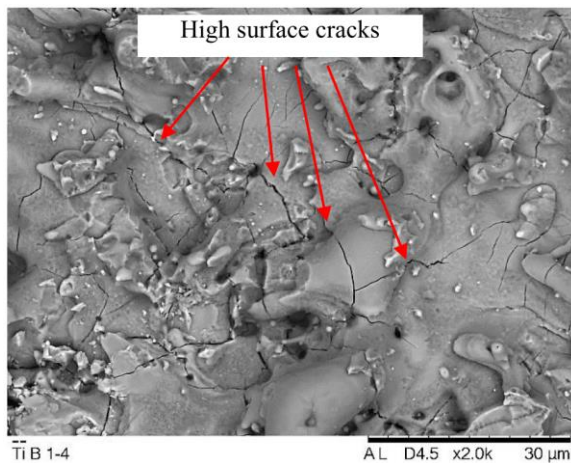
а)



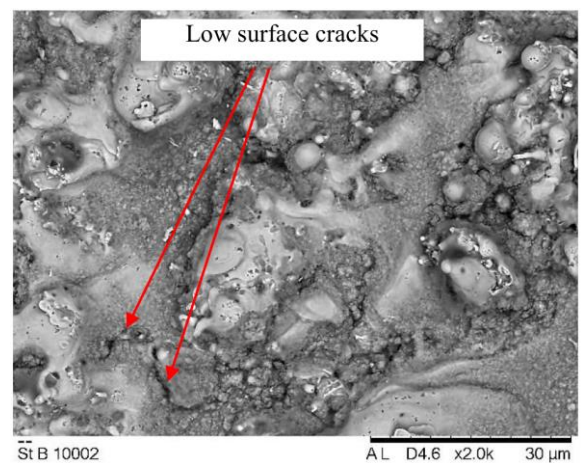
б)

Рисунок 1.3 – Мікрошліфи зразків після ЕЕВО, що ілюструють товщину та мікротріщини білого шару: а) – титановий сплав Ti6Al4V, б) – вуглецева сталь AISI 1050 [103].

На рисунку 1.4 а та б представлено SEM мікрофотографії поверхонь Ti6Al4V та вуглецевої сталі AISI 1050 відповідно за однакових умов обробки ($IP = 16A$, $T_{on} = 0,2$ мкс, $T_{off} = 0,5$ мкс, $WS = 3$ м/хв, $WT = 3,5$ Н) з використанням латунного дріт'яного електроду. Тріщин на поверхні Ti6Al4V набагато більше, ніж у вуглецевої сталі AISI 1050. Навпаки, матеріал з низькою теплопровідністю не може досить швидко розсіювати енергію на сусідні ділянки. Це дозволяє енергії іскри затримуватися довше, що призводить до утворення більш товстого білого шару з більшим розтріскуванням.



а)



б)

Рисунок 1.4 – SEM мікрофотографії поверхонь після ЕЕДВ, які ілюструють їх стан та мікротріщини білого шару: а) – титановий сплав Ti6Al4V, б) – вуглецева сталь AISI 1050 [103].

Puri A.B. та Bhattacharyya B. [136] здійснили моделювати глибини білого шару за допомогою методології поверхневої реакції (response surface methodology – RSM) у процесі ЕЕВО, що включає чорновий різ з подальшими проходами електроерозійної обробки. Було встановлено, що глибина білого шару збільшується зі збільшенням часу імпульсу під час першого різку та зменшується зі збільшенням часу імпульсу протягом наступних проходів. Hassan M. A. та ін. [53] вивчали цілісність поверхні сталі AISI 4140 за ЕЕВО, і зробили висновок, що тривалість імпульсу має більший вплив на текстуру поверхні порівняно з піковим струмом.

Прикладом реалізації результатів досліджень, подібних до наведених, є комерційна технологічна система багатопрохідної ЕЕВО, розроблена спеціалістами компанії Sodick – система вигладжування поверхні “Super-BS”:

1-й прохід – імпульси 700 нс 950А;

2-й прохід – імпульси 100 нс 90А;

3-й і далі до 12-го проходу – схеми коротких повно-біполярних імпульсів струму.

В рекламних матеріалах компанії стверджується, що вже після другого проходу шорсткість поверхні становить $Ra = 0,7$ мкм, а по завершенні вигладжування поверхні $Ra = 0,17$ мкм.

Якісно іншим методом модифікації ЕЕВО поверхні є технологія із застосуванням емульсій в якості робочої рідини. Так спеціалісти компанії Sodick пропонують технологію “Super PIKA-W” – дзеркальне фінішування поверхні з емульсією PIKAGEN. Концентрат PIKAGEN WHITE – парафіністий вуглеводень (59,5%) з металевими порошковими добавками (40,0%) + 0,5% ксилолу (діметілбензолу).

В процесі ЕЕВО в високодисперсному діелектрику PIKAGEN утворюється модифікований поверхневий шар, твердість якого значно вище вихідного матеріалу (рисунок 1.5). Це відбувається завдяки більшій температурі процесу і концентрації вуглецю, процесам дифузії металу порошку в поверхню деталі, а також затягування лунок і мікротріщин розплавленим металом частинок порошку.

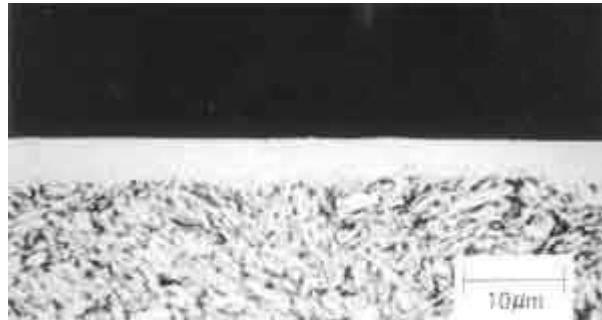


Рисунок 1.5 – Поверхневий шар утворює єдине ціле з металом-основою за технологією “Super PIKA-W” компанії Sodick [<https://www.sodick.com>].

Засіб поліпшення властивостей поверхні за ЕЕВО шляхом додавання порошоків в діелектричну робочу рідину добре описаний в літературі [56]. Поверхневий шар, що містять хром, може бути утворений на обробленій поверхні шляхом використання суспензії з хромом. За високого розрядного струму та високої концентрації хрому шар, що містить хром, стає товстим. Отримується ЕЕВО поверхня з низькою шорсткістю, високою твердістю, підвищеною водовідштовхуваністю та корозійною стійкістю [179].

Додавання часток змінює механізм видалення матеріалу в процесі електроерозійної руйнації матеріалу [182]. На рисунку 1.6 показана схема нормального одиничного електричного розряду в міжелектродному проміжку в робочій рідині без домішок і в рідині зі суспендованими частинками. Визначено, що додавання порошку призводить до збільшення розміру проміжку, що згодом призводить до зменшення щільності електричного розряду та тиску утвореного газу для одиничного розряду. Розряд відбувається над поверхнею в ланцюжку провідності, сформованим частинками. Як видно з рисунку,

механізм видалення модифікованого матеріалу для додавання порошків протягом звичайного одноразового електричного розряду є комбінованим впливом механічної тяги, обумовленої вибухом газу, переважно від випаровування робочої рідини та впливу зваженої частинки. Кількість матеріалу, видаленого шліфувальним впливом суспендованих частинок всередині проміжку, незначна. Слабший вибух газу в проміжку з додаванням порошку може призвести до зниження маси видаленого матеріалу протягом звичайного процесу одиничного електричного розряду. Таким чином, вражаюча дія частинок має незначний ріжучий ефект, що в основному сприяє поліпшенню фінішування поверхні.

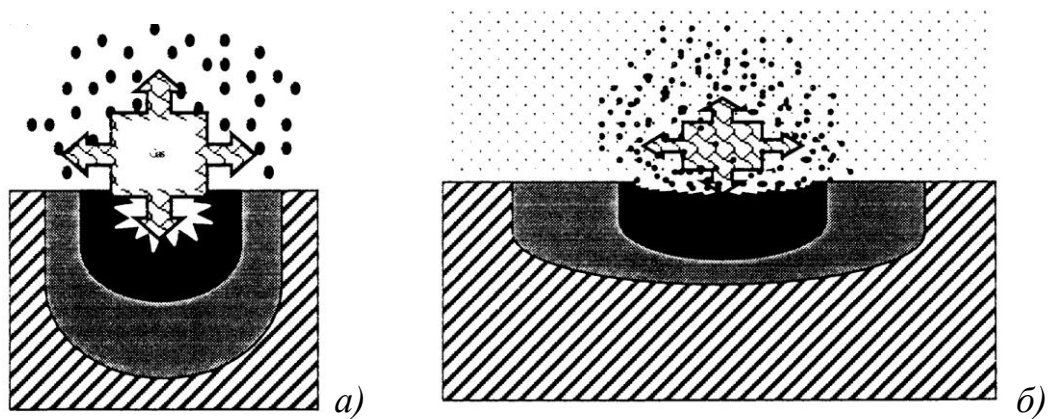


Рисунок 1.6 – Схеми видалення матеріалу при іскровому розряді: *а)* – в робочій рідині без домішок, *б)* – в рідині з порошком [182]

Toshimitsu R. зі співавторами [179] також проводили дослідження процесу утворення шару хрому на поверхні отриманої за ЕЕО з використанням в якості робочої рідини суміші з хромовим порошком.

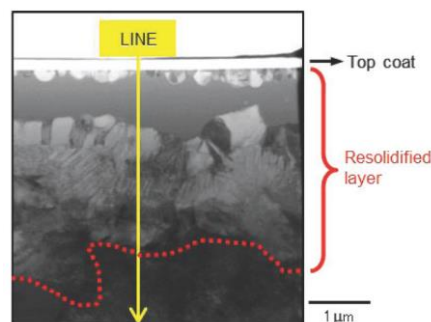


Рисунок 1.7 – ТЕМ зображення поперечного перерізу поверхні інструментальної сталі SKD11, після ЕЕО в рідині з порошком хрому [179].

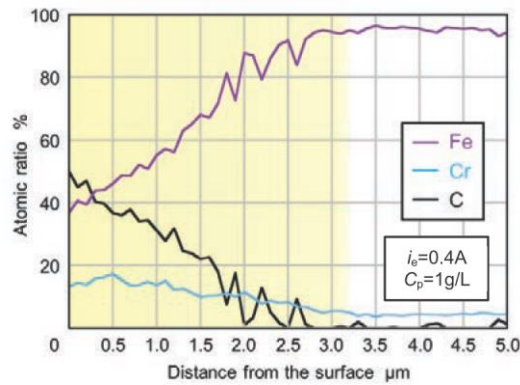


Рисунок 1.8 – Аналіз складу матеріалу заготовки вздовж лінії на поперечному перерізі [179].

На рисунку 1.7 зображено поперечний переріз поверхневого шару після ЕЕО. Чітко спостерігається тонкий переплавлений поверхневий шар товщиною приблизно 3 мкм, який складається переважно з двох шарів. Біля поверхні утворюється аморфний шар, в якому кристалічне зерно не спостерігається. Під аморфним шаром утворюється інший переплавлений шар зі стовпчастими кристалами. Для того, щоб дослідити розподіл хрому по глибині та товщину шарів, що містять хром, було виконано аналіз компонентів на лінії, показаної на рисунку 1.8. Поблизу поверхневого шару крім заліза, яке є основним компонентом SKD11, спостерігається значна кількість хрому. Вміст хрому зменшується з глибиною і стає майже таким, як і в основному матеріалі. Це очевидно забезпечує міцну адгезію поверхневого шару.

Однак технологія фінішування поверхні з емульсією PIKAGEN компанії Sodick не знайшла широкого застосування. Перша причина полягає в високій вартості емульсії, а інша – в нестабільності процесу. Як описують дослідники [100, 182], стабільний механізм обробки вимагає рівномірно розподілених ділянок розряду, які залежать переважно від концентрації та розподілу порошку, продуктів ерозії, бульбашок, деіонізації та нерівностей поверхні. Їх одночасна присутність створює великі труднощі при сегрегації ефектів, пов'язаних з нерівномірністю розподілу кожного компонента суміші.

1.1.2 Технологічні схеми та сучасні показники вихідних параметрів розмірної електрохімічної обробки імпульсним струмом

Близько 1834 року Майкл Фарадей (1791-1867) виявив зв'язок між електричним зарядом і перетворенням матеріалу шляхом електролізу.

В.М. Гусев та Л. О. Рожков в 1928 році використовували анодне розчинення з метою контрольованого розчинення металу – електрохімічної обробки (ЕХО).

В 1959 році в США з'явився перший промисловий верстат ЕХО виробництва Anocut Engineering Company.

В 1960 – 1970-х роках почалося використання ЕХО в аерокосмічній галузі та в інструментальному виробництві в СРСР і в Західній Європі. В цей період розроблялися електрохімічні технології, і ряд компаній (Philips, Hitachi, Mitsubishi, AEG Elotherm, Amchem) забезпечували виробництво обладнання.

Близько 2000 року з'явилися імпульсні технології ЕХО, які реалізовувалися за допомогою електричних імпульсів та механічним шляхом.

В період 1998 – 2011 років введено в експлуатацію комплекс нових біполярних мікросекундних електрохімічних імпульсних технологій обробки з використанням вібраційного електроду-інструменту. З'являється термін «Pulse Electrochemistry Machining (РЕСМ)» – імпульсна електрохімічна обробка.

Починаючи з 2000 року імпульсна електрохімічна технологія знаходить застосування в мікрообробці, у тому числі за використання довжини імпульсу в півмікросекундному діапазоні [145].

Електрохімічна обробка – нетрадиційний метод обробки, в якому матеріал видаляється за допомогою механізму розчинення аноду в процесі електролізу [143]. Напруга (10-25 вольт) подається на міжелектродний проміжок між попередньо сформованим інструментом-катодом та заготовкою-анодом. Електроліт (наприклад, водний розчин NaCl) тече з високою швидкістю (10 – 60 м/с) через міжелектродний проміжок (0,1 – 0,6 мм). Щільність струму за-

звичай становить від 20 до 200 А/см². Швидкість анодного розчинення, яка регулюється законами електролізу Фарадея, залежить від електрохімічних властивостей металу, властивостей електроліту та електричного струму чи напруги, що подаються.

Переваги ЕХО в порівнянні з іншими традиційними процесами обробки полягають в її застосуванні незалежно від твердості матеріалу, у відсутності зносу інструментів, порівняно високій швидкості видалення матеріалу, в отриманні гладкої та яскравої поверхні без змінених приповерхневих шарів, а також у можливості виготовлення компонентів складної геометрії без застосування силових стресових навантажень [169].

Імпульсна електрохімічна обробка – це варіація ЕХО, де замість постійного струму використовується імпульсний струм. Імпульсна ЕХО забезпечує більш високу точність обробки, кращу стабільність процесу та придатність для контролю. Ці переваги обумовлені поліпшенням потоку електроліту в міжелектродному проміжку, посиленою локалізацією анодного розчинення, а також малими та стабільними величинами міжелектродних проміжків, що застосовуються в імпульсній ЕХО [142, 158].

Багатьма дослідниками встановлено, що величина МЕР є критичним параметром, який потрібно контролювати під час процесу ЕХО [9, 11, 190]. Налаштування та підтримка невеликого, але стабільного розміру МЕР за ЕХО є дуже важливим для досягнення кращої точності обробки. Моніторинг величини МЕР базується на сигналах зворотного зв'язку напруги та струму від осцилографів або датчиків струму [112, 193].

За технологічної схеми ЕХРО ДЕ в складі комбінованої технології електроерозійної та електрохімічної обробки забезпечення стабільного значення МЕР відбувається завдяки точним приводам електроерозійного верстату, які підтримують задану еквідистанту вздовж всієї траєкторії руху ДЕІ. Разом з тим є необхідність розробки автоматизованої системи моніторингу стану МЕР в реальному часі проходження процесу ЕХРО ДЕ на основі аналізу сигналів струму та напруги. Зменшення величини МЕР веде до підвищення то-

чності обробки, але при цьому можуть погіршитися умови оновлення електроліту і виникнути порушення режиму розчинення, які необхідно вчасно виявляти та вживати заходи по корекції параметрів технологічного процесу.

Теоретичне значення для мінімальної величини МЕР за ЕХО, що обмежується часом зарядження та характеристиками імпульсу, оцінюється в 20 нм [158]. За таких значень величини МЕР в технологічній схемі ЕХРО ДЕ неможливо забезпечити подачу електроліту в зону розчинення. Тому обмежуючим чинником при виборі малих значень МЕР буде перш за все швидкість електроліту, яка може бути надана струменю по всій висоті МЕР вздовж дротяного електрода. Отже виникає задача створення математичного апарату для розрахунку гідродинамічних параметрів потоку електроліту за технологічної схеми ЕХРО ДЕ.

Також на точність ЕХО впливають властивості електролітів. А. К. М. De Silva та ін. [27] розробили процес ЕХО з використанням малих міжелектродних проміжків (< 50 мкм) для масового виробництва деталей з невеликою (100 мм^2) площею поверхні. Отримано точність розмірів ± 2 мкм, шорсткість поверхні $R_a = 0,01$ мкм. Відмічається, що властивості електроліту, особливо концентрація, відіграють істотну роль у контролі розмірної точності ЕХО. Проведені експерименти, в яких міжелектродний проміжок змінювався від 10 до 200 мкм, а концентрація електроліту – від 47 до 229 г/л водного розчину. Вплив концентрації електроліту на процес точності ЕХО описується за допомогою емпіричних формул. При застосуванні електролітів з низькою концентрацією ступінь локалізації більший, що дозволяє реалізувати більш високу точність, ніж при високих концентраціях електроліту.

Rajurkar K. P. та ін. [141] зосередили увагу на прогнозуванні кількості матеріалу, що підлягає видаленню, передбачивши мінімальний припуск на обробку та підвищивши ступінь локалізованого розчинення. За використання пасивуючого електроліту NaNO_3 розчинення анода має бути максимальним при більш високій щільності струму і майже нульовим при менших щільності струму. Результати свідчать про ефективність використання короткого імпу-

льсу для досягнення більш високого ступеня локалізованого розчинення. Встановлено, що імпульсна ЕХО з тривалістю імпульсу часом 1 – 3 мс та коефіцієнтом наповненості шпаруватістю 50% забезпечує оптимальні параметри бажаної точності розмірів.

Важливим є склад матеріалу, що обробляється, та його попередня термічна обробка. Jeng M.C. та ін. [65] вивчали вплив вмісту вуглецю, мікроструктури та робочого тиску подачі електроліту на швидкість видалення металу та ефективність виходу за струмом при електрохімічній обробці вуглецевих сталей. У цій роботі проведено дослідження обробки чотирьох сталей з різним вмістом вуглецю та різними процедурами термічної обробки (загартування, покращення та відпал). Отримані наступні результати:

- швидкість видалення металу та ефективність виходу за струмом зростають зі збільшенням вмісту вуглецю;
- сталі з мікроструктурою загартування та з мікроструктурою покращення мають більшу швидкість видалення матеріалу та ефективність виходу за струмом, ніж сталі з мікроструктурою відпалу;
- шорсткість обробленої поверхні сталі з мікроструктурою відпалу більша, ніж у загартованих і покращених сталей.

Для технологічної схеми ЕХРО із застосуванням дротяного електроду характерна наявність суттєвої нерівномірності розподілу густини струму на поверхні аноду. Це зумовлює одночасне існування кількох зон з різним рівнем густини струму. У роботі [95] досліджено механізми електрохімічного полірування (густина струму менше 1 А/см²) та електрохімічної обробки (густина струму більше 10 А/см²) інструментальної штампової сталі SKD11 (аналог X12M, X12Ф1). Були оцінені відповідні параметри електрохімічного процесу на активному, пасивному та транспасивному режимах розчинення у водному розчині NaNO₃ з концентрацією 10, 20 та 30%. Наведені якісні та кількісні параметри стану поверхні після кожного режиму обробки, однак загальних закономірностей електрохімічного розчинення не встановлено.

Важливим параметром імпульсної ЕХО є не тільки амплітуда струму, але і форма сигналу електричного поля. Американські вчені із Faraday Technology Inc. (керівник Е. J. Taylor) розробили ряд ефективних технологій полірування пасивних і надпасивних матеріалів, в тому числі і тих, які були попередньо оброблені електроерозійним способом [64, 168, 177]. Наряду із робочою частиною імпульсу прямої полярності застосовується частина імпульсу зворотної полярності, а в період паузи між імпульсами надається невеликий релаксаційний струм. Вибір складної форми імпульсів надав можливість активно руйнувати пасиваційні плівки на поверхні аноду і видаляти продукти реакції з МЕП.

1.2 Підвищення ефективності та якості обробки металів при застосуванні гібридних та комбінованих технологій

1.2.1 Огляд альтернативних комплексних технологій покращення параметрів поверхні після електроерозійної вирізної обробки

Існує ряд гібридних процесів обробки, які реалізують перевагу ЕЕВО в комбінації з іншими методами обробки [56]. Одне з таких поєднань – дротяне електричне розрядне шліфування (wire electrical discharge grinding – WEDG), яке зазвичай застосовується для мікрообробки тонких стержнів. Використовується єдина напрямна, яка забезпечує натяг дроту в зоні іскрового розряду між стержнем та передньою частиною дроту та мінімізує вібрацію дроту. Тому можна вишліфувати стержень діаметром 5 мкм з високою точністю, стабільною повторюваністю і задовільною прямолінійністю.

В якості різновиду застосовують технологію електрохімічного дротяного шліфування (wire electrochemical grinding – WECG) [107]. Електрохімічне розчинення замінює електричний розряд з метою отримання деталі з високоякісною поверхнею для широкого діапазону умов обробки.

Поліпшити якість поверхні і зменшити залишкові напруження після ЕЕВО вдається шляхом накладання ультразвукових коливань на дротяний електрод [43].

Робота [2] присвячена підвищенню якості поверхні після ЕЕВО шляхом видалення переплавленого шару методом магнітно-абразивної обробки. Проведено трирівневий повнофакторний експеримент для вибору оптимальних параметрів процесу, видалено повністю поверхневі шари і знижено шорсткість. Однак технологічна схема передбачає застосування обертального руху магнітного поля навколо деталі і тому застосовна виключно для обробки циліндричних поверхонь.

Kumar A. з колегами [86] виконали огляд механізмів дії та перспектив розвитку технології електроерозійної обробки із застосуванням додаткової суміші (additives mixed electrical discharge machining – AEDM). Суть технології полягає у використанні абразивних порошкових добавок, суспендованих у діелектричному середовищі ЕЕО. Під впливом великої інтенсивності електричного потенціалу в МЕП частинки заряджаються, прискорюються, рухаються в зигзагоподібному режимі і можуть виступати провідниками. Внаслідок іскроутворення виникає механічна тяга, спричинена вибухом газу, головним чином від випаровування, яка викликає вражаючий удар зважених частинок по поверхні аноду. Тонкий шар матеріалу видаляється шліфувальним ефектом зважених частинок. Однак роль доданих частинок у механізмі розряду є складною. Високі концентрації добавок можуть спричинити нестабільну та неефективну роботу, тоді як відсутність частинок може призвести до припинення процесу шліфування. Занадто складною постає проблема забезпечення керованості процесу.

1.2.2 Комбінована технологія електроерозійної та електрохімічної обробки

Першим застосуванням ЕХО для фінішування поверхні після ЕЕВО вважається робота [108]. Masuzawa T. та Sakai S. запропонували після вирі-

зання деталі А (рисунок 2.) використовувати в якості катоду залишок заготовки В, який по конфігурації забезпечить рівномірний міжелектродний проміжок за подальшої електрохімічної обробки. Нажаль така технологія не мала успіху через суттєві недоліки самої технологічної схеми. Виникали проблеми з точністю позиціонування аноду, нерівномірної подачі електроліту по всьому міжелектродному проміжку, дотримання заданої густини струму при різних конфігураціях деталі.

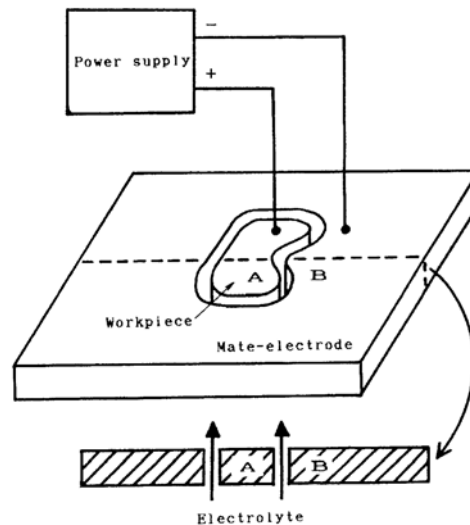


Рисунок 1.9 – Метод електрохімічного фінішування поверхні після ЕЕВО [108].

Ramasawmy Н. та Blunt L. [144] досліджували різні електроліти для ЕХО поверхні після ЕЕО. Встановлено, що кисле середовище надає кращу згладжуючу та полірувальну дію на рельєф поверхні. Для екологічного аспекту нітрат натрію також дає хорошу швидкість полірування, але густина струму повинна бути ретельно підібрана.

Дослідник Dang N. M. [20] розробив і застосовує синхронну електроерозійну та електрохімічну технологію в мікрообробці при прошиванні отворів (рисунок 1.10). Спочатку електроерозійним способом знімають частину матеріалу потім подають електроліт і електрохімічним методом «вирівнюють» поверхню. Далі цикл повторюється. В зв'язку з періодичною зміною

робочої рідини процес є довготривалим. Але в результаті обробки з високою точністю дотримані геометричні розміри і якість поверхні (рисунок 1.11).

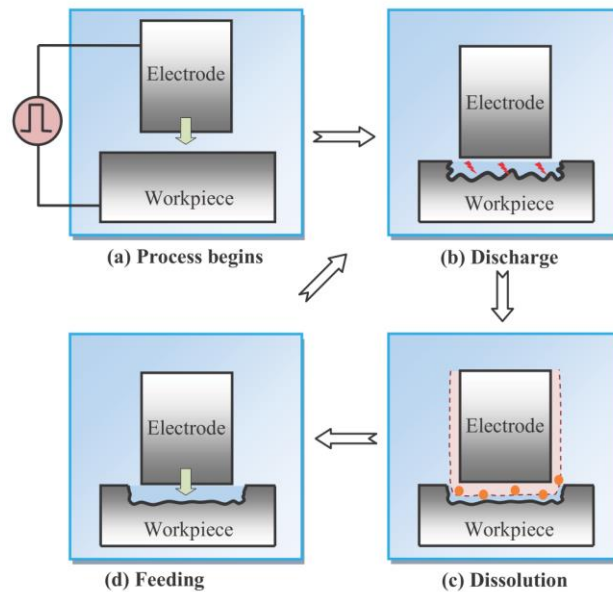


Рисунок 1.10 – Принцип застосування синхронної електроерозійної та електрохімічної технологій в мікрообробці [20].

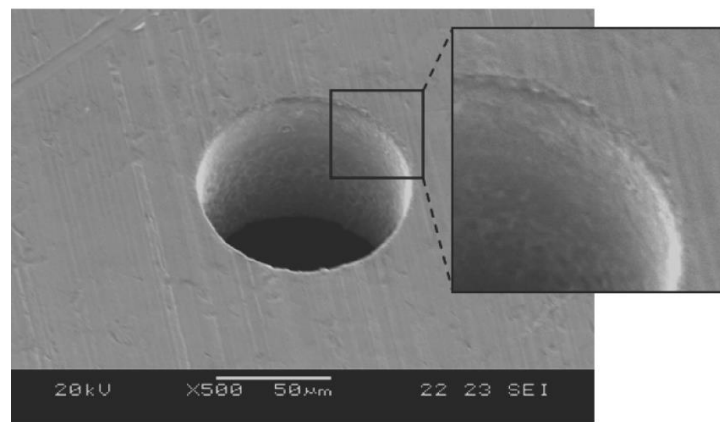


Рисунок 1.11 – Мікроотвори, виготовлені за синхронною електроерозійною та електрохімічною обробкою з використанням імпульсів частотою 500 кГц, шпаруватістю 30% та швидкістю подачі електрода 0,2 мкм/с.

На рисунку 1.12, *а* продемонстрована поверхня отвору вкрита кратерами від електричних розрядів при застосуванні тільки електророзрядної обробки, а на рисунку 1.12, *б* – згладжена поверхня, отримана за синхронною електроерозійною та електрохімічною технологією.

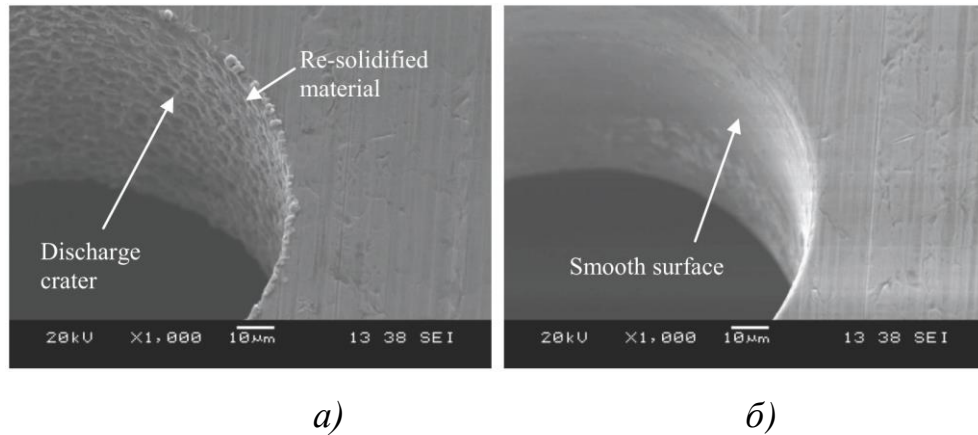


Рисунок 1.12 – СЕМ-зображення мікроотворів, виготовлених без (а) та з (б) ефектом електрохімічного розчинення матеріалу [20].

Група німецьких вчених опублікувала результати застосування швидкого та регульованого шліфування поверхні нержавіючої сталі з використанням імпульсної ЕХО після прошивної ЕЕО [4]. Задача полягала у створенні деталей з чітко вираженою шорсткістю в межах невеликих допусків. На прошивному електроерозійному верстаті FORM20, виробництва GF AgieCharmilles Switzerland, відтворювалася форма деталі. Далі на верстаті PEMCenter8000, виробництва PEMTec SNC France, з використанням імпульсної ЕХО та відповідної форми електрода отримувалась необхідна шорсткість поверхні в різних умовах технологічного процесу. Крім того, вказується можливість додання текстури поверхні за імпульсної ЕХО, що створить аналогічний процесу ЕЕО результат, але без недоліків зони впливу тепла, зносу інструменту та тривалого часу напівчистої та чистої ЕЕО. Автори вказують на можливість швидкого регулювання шорсткості металевих поверхонь шляхом використання одного інструменту в якості катоду та простою зміною параметрів технологічного процесу в керуючій програмі. Разом з тим зазначають, що існують певні обмеження пов'язані зі складністю вибору параметрів процесу. Побічні хімічні ефекти, наприклад, пасивація та контроль процесів – це все-таки сфера, яка потребує більш детальних досліджень.

1.3 Аналіз сучасних методів математичного моделювання технологічних процесів електроерозійного дріт'яного вирізання та електрохімічної розмірної обробки

1.3.1 Моделі електроерозійної вирізної обробки

Статистичне моделювання для оптимізації процесу ЕЕВО дуже часто використовується багатьма дослідниками.

Методологія поверхні відгуку (response surface methodology – RSM) – це сукупність математичної та статистичної методики, яка є корисною для моделювання та аналізу проблем, у яких реакції інтересу впливають на кілька змінних, а метою є оптимізація цих відповідей. Ці характеристики роблять RSM корисним підходом для моделювання та оптимізації ЕЕВО [41]. У цьому методі, якщо відповідь добре моделюється лінійною функцією незалежних змінних, то функція наближення є моделлю першого порядку. Якщо в системі існує нелінійність, то слід використовувати многочлен вищої степені, наприклад, модель другого порядку.

Дисперсійний аналіз (Analysis of variance – ANOVA) використовувався для оцінки придатності регресійної моделі ЕЕВО [113, 121]. У цьому методі розглядаються ефекти шумових чинників. Крім того, модель статистичної оптимізації може подолати обмеження класичних методів для отримання оптимальних умов процесу. Враховується взаємодія між змінними процесу. Основним недоліком цього методу є можливість отримання оптимального значення, яке може виявитися локальним. Крім того, цей метод є досить дорогим, тому що необхідно виконувати велику кількість експериментів.

Багато авторів здійснювали моделювання процесу ЕЕВО, використовуючи метод Тагучі (grey-Taguchi) [89, 136, 154]. Цей метод дозволяє проводити аналіз багатьох різних параметрів без великої кількості експериментів. Основним недоліком цього методу є те, що отримані результати є лише відносними і не точно вказують, який параметр найбільше впливає на продуктивність процесу. Крім того, оскільки ортогональні масиви не перевіряють всі

комбінації змінних, вони не можуть виявити значимість взаємодії чинників між собою, що є важливим за ЕЕВО.

В роботі [117] порівнюється ефективність шести різних нетрадиційних алгоритмів оптимізації для моделювання процесу ЕЕВО.

В роботі [161] використовується модель нейронної мережі з метою встановлення взаємозв'язку між параметрами та характеристиками ЕЕВО. Автори також рекомендують методику вибору оптимальних параметрів процесу для підвищення продуктивності обробки, що досягається за допомогою алгоритму Jaya.

Дослідниками розроблені та розвинуті ряд моделей на основі рівнянь математичної фізики, які описують фізичні процеси, що лежать в основі ЕЕВО. Механізм ерозії в ЕЕО є дуже складним явищем і включає багато фізичних процесів. Насамперед, ЕЕО – це термоелектричний процес обробки, в якому матеріал знімається з робочої деталі за дії енергії, викликаной серією електричних розрядів, утворених між інструментом-електродом та електро-дом-заготовкою, занурених в діелектричне середовище. Електричні розряди або іскри, що утворюються в проміжку, виконують роботу по видаленню матеріалу шляхом плавлення і випаровування. Діелектричне середовище діє як деіонізуюче середовище між електро-дом і робочою деталлю, забезпечуючи тим самим оптимальні умови для генерування іскри, а також вимивання продуктів ерозії. Математичне моделювання фізичних явищ, що відбуваються в міжелектродному проміжку продовжує бути темою багатьох досліджень [90, 157].

Основна мета моделювання полягає в передбаченні видалення матеріалу з інструменту і заготовки, а також у визначенні максимальної температури, що досягається в каналі розряду. Крім того моделювання дозволяє за використання реальних значень струму і напруги провести аналіз поверхневої структури. Можливо провести аналіз поверхневої структури при використанні ідеалізованих значень струму і напруги, а також підібрати форму електричного імпульсу. Можна проаналізувати вплив фаз розряду в обраних часових

проміжках на процеси руйнування матеріалу та формування поверхневих шарів [156].

Було проведено небагато досліджень щодо самого розряду та плазми, які утворюються під час процесу ЕЕО, головним чином завдяки складній фізиці [32]. Подальші вдосконалення ЕЕО, особливо для мікрообробки, вимагають кращого контролю та розуміння розряду та його взаємодії з електродами. Краще розуміння іскрового процесу також зменшить проблеми, пов'язані з його стохастичним характером. Крім того, не вистачає експериментальної характеристики плазми за ЕЕО. Деякі спектроскопічні вимірювання зроблені, але залишаються дуже неповними [1]. Плазму за ЕЕО експериментально важко дослідити (невеликі розміри, слабка інтенсивність світла, погана відтворюваність). Ці труднощі є основною причиною відсутності експериментальних даних, які є важливими як вхідні дані, так і для перевірки математичних моделей.

Вплив тепла, яке надходить від електричних розрядів, на металургійні та механічні властивості сталі, досліджено в роботі [132] за допомогою локальних вимірювань температури в мікронних масштабах та сучасних чисельних методів. Теплове поле, фазова динаміка, залишкове напруження та вплив декількох іскор на заготовку розраховано за допомогою зворотного аналізу, чисельних методів та аналізу напружень. Отримана в результаті конфігурація напружень обумовлена спільним впливом утворення мартенситу в термічно зміненій зоні і тепловим розширенням матеріалу. Це створює умови для виникнення тріщин і їх поширення всередині білого шару, згідно з експериментальними спостереженнями.

Теплова модель була розроблена в роботі [146] на основі локальних вимірювань температури, зроблених за допомогою мікротермопар та з швидкою ІЧ-камерою високої роздільної здатності. Ці інструменти дозволили експериментально визначити катодне розширення плазми одиничного розряду. Змодельована теплова історія переплавленого шару і отримана багатшарова структура, яка складається з мартенситу та залишкового аустеніту і

співпадає з експериментальними спостереженнями. Ця ж теплова модель була використана для обчислення конвекційного потоку у ванні розплаву, створеного розрядом. Вперше показано, що конвекція стає суттєвою вже через 50 мкс після початку іскри. По результатам цієї роботи можна зробити важливий висновок про те, що за моделювання теплової дії коротких розрядів тривалістю 1 – 2 мкс, характерною для ЕЕВО, конвективними процесами можна знехтувати без втрати адекватності моделі.

Канал розряду має не циліндричну форму. В роботі [105] спочатку було використане 3D моделювання, проте згодом автори прийшли до результату, що розрахунок такої моделі займає забагато часу. Тому на основі обчислювальних експериментів був зроблений висновок що осесиметрична модель буде виконувати аналогічні функції.

Наряду з переважною більшістю термофізичних моделей суто теплової руйнації матеріалу за ЕЕО [67, 68] розглядається моделювання молекулярної динаміки процесу, за якого механізм видалення матеріалу можна пояснити двома способами: один – шляхом випаровування, а інший – вибухом перегрітого металу [199]. Але вибухова руйнація матеріалу характерна тільки для мікро-ЕЕО за досягнення густини теплової потужності порядку $2,5 \text{ ГВт/см}^2$, тривалості імпульсу 50 пс, радіусі каналу розряду 35 \AA .

Сучасні моделі одиничного розряду та серії послідовних розрядів реалізуються переважно в математичних програмних пакетах COMSOL Multiphysics, ANSYS, ABAQUS, розрахунки в яких проводяться на основі методу скінчених елементів [96, 116, 174]. Застосування мультифізичного інструментарію дозволяє позбутися обмежень попередніх, більш ранніх моделей, таких як припущення про постійний радіус каналу розряду, наближення джерела тепла до точкової або дископодібної форми і постійних теплофізичних властивостей матеріалу заготовки [45, 162].

В роботі [55] розглянуті моделі, характерні суто для ЕЕВО, пов'язані з прогином і вібраціями нежорсткого дротяного електрода. Проведено аналіз чотирьох видів сил, що діють на дротяний електрод: сила реакції розряду,

електростатична сила, гідродинамічна сила та електромагнітна сила. В роботах [50, 178] проведено моделювання вібрації та відхилення дроту від прямолінійної форми. Електромагнітна сила та гідродинамічна сила були проігноровані, а вплив частинок продуктів ерозії не розглядався.

1.3.2 Моделювання процесів електрохімічної розмірної обробки

Незважаючи на те, що фундаментальні принципи, які беруть участь в ЕХО, добре відомі, моделювати процес складно, оскільки існує декілька фізико-хімічних явищ, деякі з яких відбуваються одночасно [55].

Електрохімічні реакції. Хімічні реакції, що відбуваються на аноді та катоді, викликають виділення іонів, кисню та водню з електродів та електроліту. Масообмін, а також концентрації в просторі та часі кожного компонента повинні бути визначені, що приводить в кінцевому підсумку до розподілу струму в області електроліту та на поверхнях електродів.

Рух електроліту. Потік електроліту через МЕР може бути ламінарним або турбулентним. Хімічні реакції на аноді та катоді призводять до утворення бульбашок водню на катоді та пухирців кисню на аноді. Наявність цих бульбашок призводить до того, що потік електроліту стає двофазним. Бульбашки впливають на провідність електроліту, тим самим ускладнюючи процес. Крім того швидкість електроліту в приелектродній зоні впливає на його оновлення.

Теплові ефекти. Електрохімічні реакції викликають утворення тепла в подвійному шарі і в електроліті (Джоулеве нагрівання). Ця теплова енергія викликає підвищення температури електроліту, що призводить до подальшої зміни електропровідності електроліту.

Анодне розчинення. Електрохімічні реакції викликають розчинення деталі, що обробляється, внаслідок чого її форма змінюється з часом. Ця зміна рельєфу поверхні заготовки з часом моделюється як задача з рухомими границями.

Основною метою мультиіонних моделей та моделей потенціального поля є визначення розподілу струму на поверхні електроду та в електроліті. Згідно з мультиіонною моделлю повний струм i визначається потоком заряджених компонентів [231]:

$$i = \sum_k z_k F \bar{N}_k, \quad (1.1)$$

де F – стала Фарадея, z_k – заряд, \bar{N}_k – щільність потоку k -того іонного компонента:

$$\bar{N}_k = -z_k u_k F c_k \nabla V - D_k \nabla c_k + c_k \bar{v}, \quad (1.2)$$

де c – молярна концентрація, D – коефіцієнт дифузії, u – рухомість іонів, V – потенціал, \bar{v} – швидкість електроліту.

Додаються до опису два фундаментальні рівняння. Це рівняння електричної нейтральності:

$$\sum_k z_k c_k = 0 \quad (1.3)$$

та рівняння збереження заряду:

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} = -\nabla \bar{N}_k + R_k, \quad (1.4)$$

де R_k – швидкість продукування іонів металу заготовки в основній масі електроліту. Оскільки в електрохімічній обробці реакції відбуваються на поверхні електродів, то R_k приймають рівним нулю.

Якщо попередньо визначити розподіл швидкості електроліту, то рівняння (1.1) – (1.4) можуть бути розв’язані. Тоді знаходиться розподіл напруги в електроліті та концентрація кожного виду іонів c_k , а отже, і сумарний струм.

Математичні моделі, які враховують всі три компоненти рівняння (1.2), тобто міграції, дифузії та конвекції, побудовані дослідниками тільки на основі чисельних методів отримання розв’язків навіть для простих областей. Qiu Z. H. та Power H. [138] розробили двовимірну модель на основі чисельного методу граничних елементів, яку вони застосували до плоскопаралельної електрохімічної комірки. Група бельгійських дослідників [10, 29, 30] розро-

били більш комплексну модель мультиіонного транспорту та реакцій, яка базується на двовимірних скінчених елементах.

За допомогою таких моделей вдається встановити концентрації компонентів і густину струму в межах розрахункової області електроліту. Це дає більш глибоке розуміння процесу [28, 31], але потребує занадто великого обчислювального часу для кожного окремого випадку.

Спрощення моделі більшість дослідників, зазвичай, проводять на основі наступних припущень:

- концентрація компонентів в електроліті не залежить від часу;
- електроліт неперервно оновлюється і тому градієнт концентрації може не враховуватись.

Такі припущення дають можливість вищезгадані рівняння звести до рівняння Лапласа для визначення потенціалу електричного поля при певній конфігурації електродів, застосованих в електрохімічній обробці:

$$\kappa_e \nabla \cdot (\nabla V) = 0, \quad (1.5)$$

Де питома електропровідність κ_e представляється виразом:

$$\kappa_e = F^2 \sum_k z_k^2 u_k c_k. \quad (1.6)$$

Для електрохімічної обробки дротяним електродом можливо отримати аналітичний розв'язок рівняння Лапласа (1.5) з граничними умовами, що відповідають процесу. Для конфігурації круглий катод – плоский анод, які представляють собою електроди в площині горизонтального перерізу, вводиться комплексний потенціал і методами теорії функції комплексної змінної знаходиться точний розв'язок. Математичні методи комплексної змінної для визначення форми заготовки при електрохімічному розчиненні застосовували одними з перших Collett D. зі співавторами в роботі [18]. Далі методи конформних відображень для різних форм електродів були розвинені у монографії Житнікова В.П. і Зайцева О.М. [217]. Отже доцільно в даній дисертаційній роботі вирішити задачу побудови та апробації математичної моделі роз-

поділу густини технологічного струму на поверхні аноду для електрохімічної обробки дротяним електродом на основі точного розв'язку рівняння Лапласа.

Однак рівняння (1.5) описує електростатичне поле первинного розподілу струму і через припущення незмінності концентрації реагуючих іонів не може в повній мірі описати динамічні процеси поблизу поверхні аноду. При застосуванні імпульсної електрохімічної обробки саме дифузійні процеси в прианодних шарах визначають прийнятні амплітудно-часові параметри струму.

Для процесу електрохімічного фінішування проведено моделювання варіації величини МЕР з урахуванням імпульсного струму в [102]. Модель розроблена для обертового анода (заготовки) і стаціонарного катода. Окрім прогнозування МЕР, модель передбачає значення шорсткості поверхні після закінчення обробки. Разом з тим процеси масообміну не розглядалися і вибір частоти імпульсів в широкому діапазоні 5 – 20 кГц зі сквапністю 0,2 не є достатньо обґрунтованим.

Новий ефективний підхід моделювання ЕХО із застосуванням імпульсного струму і осцилюючого катода запропоновано в роботі [77]. Використано різну величину кроку по часу при застосуванні чисельного методу розв'язку рівнянь, що описують окремі фізичні явища. Частота імпульсного струму порядку 10^3 Гц, механічних коливань катода – 10^2 Гц, зміни геометричних параметрів границі аноду – 10^{-3} Гц. Фактично відбувається обробка пачками коротких імпульсів струму з довготривалою паузою на відведення і підведення катода. Застосування різного масштаб часу дало змогу отримати точні результати за моделювання швидкоплинних електричних процесів, більш повільних гідродинамічних і найповільніших, пов'язаних з формоутворенням.

Ефективним є застосування математичних обчислювальних пакетів типу COMSOL Multiphysics на основі методу скінчених елементів з мультифізичними міждисциплінарними моделями [80, 185]. Імітаційні моделі ґрунтуються на рівняннях збереження електричного поля, руху рідини та теплопередачі у поєднанні з аналітичними функціями, що описують вплив темпера-

тури та виділення газу на питому електропровідність. Застосовується також зворотне моделювання для обчислення геометрії катода.

За допомогою ЕХО можна досягти високих швидкостей видалення матеріалів у поєднанні з найкращою цілісністю поверхні. Тим не менш, важливим обмежуючим чинником цілісності результуючої поверхні може стати значна різниця у швидкостях розчинення фаз у багатofазному матеріалі під час ЕХО. Ці відмінності в швидкостях розчинення визначають топографію поверхні.

Метод скінчених елементів успішно застосовується для моделювання еволюції мікроструктури поверхні аноду за ЕХО. В роботі [76] представлена модель для прогнозування розвитку мікроструктури, а також результати моделювання щодо впливу процесу електрохімічної обробки на результуючу поверхневу топографію феритової перлітової сталі 42CrMo4 в пасивуючій електролітній системі. За допомогою моделі можна передбачити еволюцію топографії поверхні та вплив на неї різних параметрів процесу, а також будови початкової мікроструктури.

На відміну від переважно активного розчинення металу в електролітах NaCl, механізм розчинення у пасивуючих електролітах (наприклад, розчини NaNO_3) є більш складним через можливість утворення багатьох поверхневих шарів (оксидів або подібних). Моделювання повинно пояснювати механізми утворення поверхні, зважаючи на те, що електроліти на основі NaNO_3 забезпечують особливо хорошу поверхневу якість на залізі та нікелі за ЕХО [118].

Модель компактного соляного шару, опублікована Datta M. та Landolt D. [21, 23, 24], ґрунтується на осадженні сольової плівки. Встановлено, що необхідні досить високі щільності струму, оскільки лише тоді, через обмежене видалення маси, концентрація іонів металу на поверхні стає настільки високою, що продукт розчинності солі перевищується. Обмежений масоперенос у шарі солей забезпечує блиск поверхні.

Модель компактного соляного шару була далі розвинена Grimm R. D. і Landolt D., в зв'язку з тим, що з компактними соляними шарами спектри ім-

педансу не можуть бути пояснені. Розширення складалося з постулювання іншого пористого покривного шару [42]. Тим не менш, модель дуплексного шару в літературі не розглядалася далі.

Модель перенасиченої в'язкої плівки [97] краще пояснює отримані результати ЕХО у розчинах нітратів. У цій моделі припускається, що висока концентрація іонів металів поблизу поверхні металу утворює не сольовий шар, а в'язку плівку нітратів металів з низьким вмістом води. Існування таких в'язких шарів було продемонстровано Rosenkranz С. [148]. У цій в'язкій плівці бракує води, тому постдифузія води стає обмежуючим чинником. Завдяки різним довжинам дифузійних шляхів всередині шару видалення продуктів реакції відбувається з різною швидкістю, і поверхня вирівнюється [189].

Отже актуальною є потреба в розробці та застосуванні математичних моделей масопереносу для кількісного опису дифузійних процесів в прианодних шарах електроліту за ЕХО.

1.4 Узагальнення огляду напрямків розвитку досліджень в галузі електроерозійних та електрохімічних технологій, обґрунтування завдань роботи

Аналіз літературних джерел дав можливість провести узагальнення вищенаведених експериментальних і теоретичних результатів досліджень по електричній ерозії та електрохімічному анодному розчиненню металів та сплавів на основі заліза і сформулювати наступні висновки.

1. Досягнута певна межа максимальної продуктивності електроерозійної вирізної технології і актуальними на сьогодні залишаються проблеми підвищення якості поверхні ЕЕВО, точності формоутворення нежорстким дротяним електродом.

2. Існує потреба в розробці нетермічних технологій покращення якості поверхні після ЕЕВО. Теплова дія іскрових розрядів принципово не дає можливості отримати повну відсутність переплавленого шару і зони тер-

мічного впливу на поверхні обробленої деталі, як того передбачають сучасні вимоги.

3. Сучасні показники вихідних параметрів розмірної електрохімічної обробки імпульсним струмом свідчать про її переваги в порівнянні з іншими процесами фінішування поверхні і можливість ефективного застосування в поєднанні з ЕЕВО. Окремі технологічні схеми з послідовним використанням ЕЕО і ЕХО вже реалізовані, зокрема в мікрообробці.

4. Прогнозування структурних змін в поверхневих шарах після ЕЕВО, які необхідно видалити, проводяться на основі моделювання теплових фізичних процесів видалення матеріалу внаслідок дії іскрових розрядів. Ряд кількісних характеристик процесу електроерозійної руйнації, таких як витрати енергії на переплавлення і випаровування матеріалу, швидкість розширення каналу розряду, зміна в часі і просторі густини потужності джерела тепла залишаються невизначеними саме для коротких електричних імпульсів, характерних для ЕЕВО.

5. Перехід від електрохімічної обробки до розмірної електрохімічної обробки імпульсним струмом потребує розробки більш точних міждисциплінарних математичних моделей, що реалізуються із застосуванням мультифізичних комп'ютерних обчислювальних пакетів. За ЕХРО дротяним електродом для технологічної схеми круглий катод – плоский анод можливо і необхідно розробити ряд математичних моделей на основі отриманих аналітичних розв'язків, в тому числі пов'язаних з особливостями анодного розчинення електроерозійно змінених поверхневих шарів після ЕЕВО.

Отже, на сьогодні склалися передумови розробки комбінованої електроерозійної і електрохімічної технології для розмірної обробки матеріалів, яка б поєднувала високу продуктивність електроерозії і чистоту поверхні при електрохімічному розчиненні. Окремі вдалі розробки в цьому напрямку потребують систематизації, створення наукових засад фізичних процесів, що лежать в основі цих технологій, розробки математичних моделей з експериментальним обґрунтуванням їх адекватності.

Доцільно мету роботи визначити в напрямку подальшого розвитку науково-технологічних засад комбінованої дротяної електроерозійної та електрохімічної обробки, створенні системи багатофакторного розрахунку параметрів обладнання і технологій для досягнення максимальних технологічних характеристик процесу та отримання можливості керованого формування поверхонь з новими заданими геометричними і фізико-хімічними параметрами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану та напрямків розвитку електроерозійних вирізних та електрохімічних розмірних технологій обробки матеріалів.
2. Створити методологію, підібрати прилади та розробити обладнання для дослідження і моделювання фізичних, хімічних, механічних, електричних, гідродинамічних процесів в МЕП та визначення параметрів поверхонь, модифікованих електроерозійним та електрохімічним способами.
3. Створити комплекс математичних моделей для дослідження процесів та багатофакторного розрахунку параметрів обладнання та технологій ЕЕДВ та ЕХОДЕ.
4. Отримати, проаналізувати та узагальнити дані про особливості формування геометричних та фізико-хімічних параметрів поверхневих шарів сталей розрядами, характерними для електроерозійного дротяного вирізання.
5. Встановити закономірності впливу попередньої термообробки сталей на процеси анодного розчинення за ЕХО імпульсним струмом.
6. Провести комплексні теоретичні та експериментальні дослідження впливу складу електроліту, гідравлічних характеристик потоку промивання МЕП, складу та структури поверхневих шарів досліджуваних сталей, електричних параметрів джерела живлення, величини МЕП на закономірності анодного розчинення приповерхневих шарів вуглецевих та легованих сталей.
7. Визначити та проаналізувати особливості похибок формоутворення при електроерозійному дротяному вирізанні.

8. Запропонувати загальну концепцію технології електрохімічної модифікації поверхневих шарів вуглецевих та легованих сталей після електроерозійного дротяного вирізання.

9. Сформувати базові засади системи автоматизованого проектування та вдосконалення технологічних процесів комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом орієнтованої на визначення областей максимальних характеристик комбінованої технології.

РОЗДІЛ 2

ПРИЛАДИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕН- ТІВ, ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Експериментальна база досліджень: стандартні, модифіковані та спеціально розроблені прилади, обладнання, матеріали

2.1.1 Загальна схема експериментального комплексу

Загальну схему експериментального комплексу, що використовувався в роботі, зображено на рисунку 2.1. Електроерозійний вирізний комплекс СЕЛД-02 складається з координатного позиціонера на лінійних приводах, які керуються ЧПК, генератора коротких імпульсів ГКІ 300-200А та станції робочої рідини. Для здійснення електрохімічної обробки комплекс доповнено джерелами живлення, які реалізують потенціостатичний і гальваностатичний режими анодного розчинення. Форма імпульсів технологічного струму задається за допомогою цифрового керуючого генератора. Також додано систему подачі електроліту в зону обробки.

Для досліджень стану міжелектродного проміжку за допомогою цифрового осцилографа знімаються параметри струму і напруги, які далі передаються на комп'ютер і обробляються в математичних програмах.

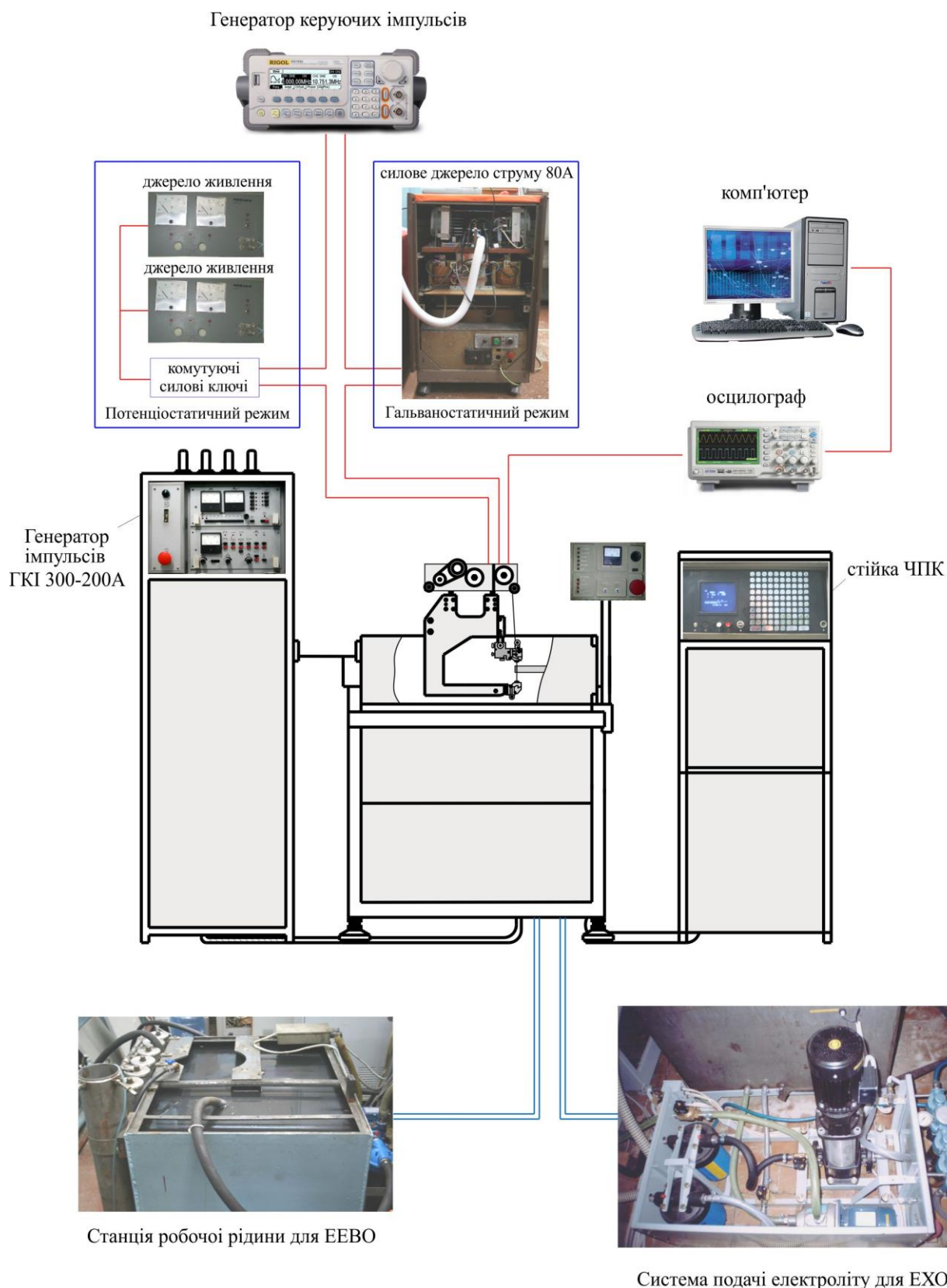


Рисунок 2.1 – Загальна схема експериментального комплексу

2.1.2 Технічні характеристики верстата та параметри імпульсів генераторів технологічного струму електроерозійного вирізного комплексу СЕЛД-02 та електроерозійного комплексу AccuteX GE-43SA.

Дослідження фізико-технологічних параметрів електроерозійного д्रो-тяного різання, фізико-хімічних та гідродинамічних процесів, що відбува-ються в міжелектродному проміжку, проводилися на серійному електроеро-зійному верстаті СЕЛД-02, який на різних етапах досліджень комплектувався генераторами технологічного струму ГКІ-300-200А і МГКІ-1.

Параметри імпульсів робочих режимів генераторів технологічного струму, на яких проводились дослідження по формуванню одиничних еро-зійних лунок і приповерхневих термічно змінених шарів, наведено в таблиці 2.1 (E_i – енергія імпульсу, I_A – амплітуда струму, τ_i – тривалість ім-пульсу, U_{np} – напруга пробою).

Таблиця 2.1 – Параметри одиничних робочих імпульсів генераторів ГКІ-300-200А та МГКІ-1

Код режиму (генератор)	E_i , мДж	I_A , А	τ_i , мкс	U_{np} , В
2-3 (ГКІ)	3,7	111	7,3	52
2-2 (ГКІ)	2,45	85	7,1	51
3-4 (ГКІ)	0,78	30	2,1	42
1 (МГКІ)	4,78	125	1,85	58

Серії експериментів також проводились на електроерозійному вирізно-му комплексі AccuteX GE-43SA виробництва ACCUTEX TECHNOLOGIES CO., LTD, Тайвань. Параметри імпульсів генератора технологічного струму наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри імпульсів генератора технологічного струму електроерозійного комплексу AccuteX GE-43SA

№ з/п	Параметр	Розмірність	Значення	
			мінімальне	максимальне
1	Тривалість імпульсу струму	мкс	0,05	1,2
2	Амплітудне значення імпульсу струму	А	33	800
3	Тривалість паузи між імпульсами	мкс	4	50
4	Енергія імпульсу	мДж	0,025	36
5	Крутизна фронтів струму	А/с	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^9$

2.1.3 Параметри джерел електричних імпульсів для реалізації потенціостатичних та гальваностатичних режимів електрохімічного анодного розчинення

Задання форми електричного імпульсу і відповідне керування силовими джерелами живлення – струму для гальваностатичного режиму і напруги для потенціостатичного режиму – здійснюються за допомогою цифрового генератора RIGOL DG1022.

Для реалізації процесів імпульсного електрохімічного розчинення на генераторі задається форма керуючого сигналу із 10 стандартних форм (синусоїдальна, прямокутна, пилоподібна та ін.), а також можлива довільна форма, яка будується з частотою дискретизації 100 млн/с. Амплітуда сигналу: 2 мВ – 10 В. Частотний діапазон: 1 мГц – 5 МГц.

Силове джерело струму 32 В, 80 А використовується для реалізації гальваностатичного імпульсного режиму ЕХО. Джерело струму побудовано за схемою 8 силових каскадів, так що кожний каскад на 1 В амплітуди керуючого сигналу від цифрового генератора дає стабілізовану силу струму в 1 А. Таким чином, забезпечується широкий діапазон вибору форми і амплітуди імпульсів струму (0 – 80 А), що дає можливість реалізувати електрохімічне розчинення, в тому числі й з надвисокими густинами струму із застосуванням дротяних електродів.

Для потенціостатичного режиму анодного розчинення використовувалося джерело живлення постійного струму Б5-21. Технічні дані джерела живлення:

- діапазон регулювання вихідної напруги від 0 до 30 В з плавним регулюванням;
- похибка встановлення вихідної напруги, не більша 100 мВ;
- джерело допускає струми навантаження від 0 до 10 А при вихідній напрузі до 10 В і від 0 до 5 А – вище 10 В;
- нестабільність вихідної напруги на вихідних клеммах при зміні напруги мережі на $\pm 10\%$ від номінального значення не перевищує 0,05 % при $U_{вих} > 5\text{ В}$ і 0,1 % при $3\text{ В} < U_{вих} < 5\text{ В}$;

В якості шунтуючого опору було використано стандартний шунт 75 мВ на 20 А, що дорівнює 3,75 мОм і не перевищує 1 % від загального опору ланцюга.

2.1.4 Хімічний склад матеріалу та типи мікроструктур зразків, що використовувались у дослідженнях

Для досліджень використовувалися сталі, хімічний склад яких наведено в таблиці 2.3. Відібрано за вмістом вуглецю доєвтектоїдні, евтектоїдна та заєвтектоїдні сталі і леговані сталі, переважно штампові, які використовуються у виробництві при обробці електроерозійним методом. Для порівняння використовувалося також ARMCO залізо.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад зразків сталей, використаних у дослідженнях (% ваги)

Марка сталі	C	Cr	Si	Mn	Ni	V	Mo	W	Cu	Fe
Сталь 45	0,45	0,25	0,27	0,65	0,25				0,25	~97
70Г	0,7	0,25	0,27	1	0,25				0,2	~97
У8А	0,8	0,2	0,25	0,23	0,2				0,2	~98

У12	1,2	0,2	0,25	0,25	0,25				0,25	~97
ШХ15	1	1,5	0,3	0,3	0,3				0,25	~96
ХВГ	0,98	1,1	0,25	0,95	0,35		0,3	1,4	0,3	~94
Х12Ф1	1,35	11,8	0,25	0,3	0,35	0,8			0,3	~84
Х12М	1,55	11,8	0,25	0,27		0,2	0,5			~85
4Х5МФС	0,36	5	1	0,35	0,35	0,4	1,35		0,3	~90
ARMCO залізо										99,9

Для встановлення впливу термообробки матеріалу на процеси електроерозійного різання та електрохімічного розчинення використовувалися попередньо термооброблені зразки з такими структурами:

- не повністю відпалені сталі – ферит з перлітом з мілкими кулеподібними карбідами;
- повністю відпалені сталі – перліт з феритом, пластинчастий перліт, цементит у вигляді сітки;
- загартовані сталі – мартенсит, мілкі включення цементиту та легованих карбідів.

2.1.5 Модернізована система подачі робочих рідин в зону обробки для реалізації комбінованої технології

Робоча рідина (найчастіше – вода) для процесу електроерозійної обробки подається коаксіально дротяному електроду з двох камер – нижньої і верхньої, оснащених соплами (рисунок 2.2). Технологічна операція відбувається у ванні так, що деталь і сопла повністю занурені в робочу рідину. Постійне вдосконалення конструкції сопел ([197] та ін.) має на меті виконання основної функції сопел – формування стабільного вузького струменя води високого тиску, який проникає в тонкий міжелектродний проміжок і ефективно видаляє продукти ерозії.

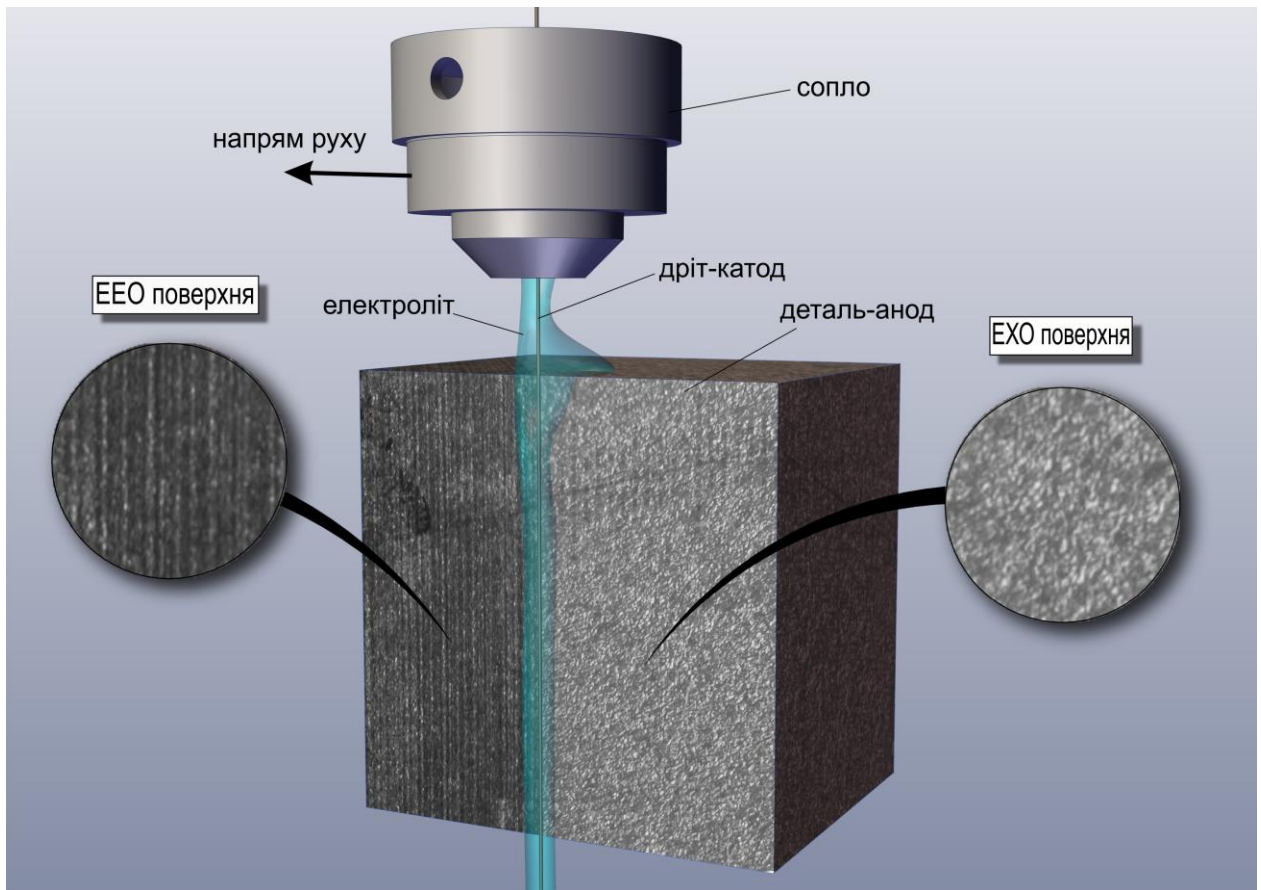


Рисунок 2.2 – Технологічна схема послідовних проходів ЕЕО та ЕХО дротяним електродом

При наступній операції за технологією електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом (ЕХРОДЕ) деталь і сопла не занурюються в рідину, а струмінь електроліту з верхнього сопла подається в зону обробки. Гідродинамічні параметри струменя визначаються залежно від складу електроліту, концентрації, режимів електричних імпульсів [5], і найголовніше, мають бути точно дотримані вздовж усієї висоти робочої частини дротяного електрода та протягом усього циклу обробки по заданій траєкторії на поверхні деталі. Розрахунки та моделювання процесів електрохімічного розчинення при ламінарному та турбулентному режимах течії електроліту чітко вказують на строгі рамки дотримання чисел Шмідта та Шервуда для ефективного контролю дифузії, конвекції та міграції іонів [119]. Особливо стабільний розподіл поля швидкостей потоку в міжелектродному проміжку має бути забезпечений для

електроліту NaNO_3 , який є надзвичайно чутливим до утворення та часу існування пасивуючих плівок на поверхні сталевих анодів при зміні швидкості руху електроліту [183].

Практика експлуатації сопла на режимах, характерних для ЕХРОДЕ, показала, що під час обробки може виникати проблема утворення бульбашок повітря всередині потоку електроліту. Це пов'язано з явищем інжекції, тобто затягуванням повітря в сопло, що змінює напрям руху рідини, порушує стабільність та однорідність струменя на виході із сопла (рисунок 2.3). Для роботи технологічної системи це неприпустимо.

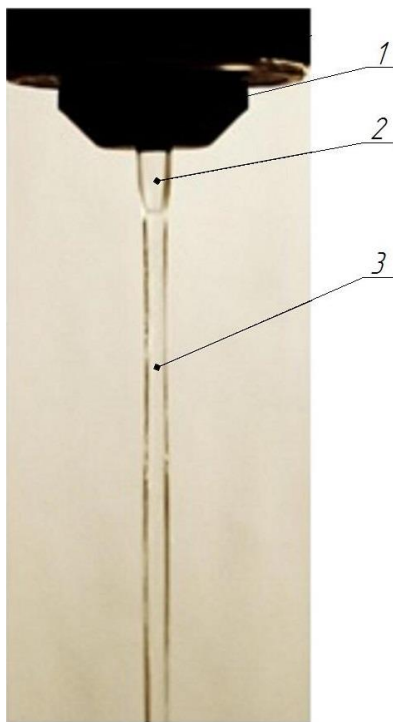


Рисунок 2.3 – Повітряна бульбашка всередині струменя на виході із сопла, що свідчить про шкідливе явище інжекції повітря, яке дестабілізує параметри потоку рідини: 1 – сопло; 2 – бульбашка; 3 – струмінь

Подолання проблеми полягає у вирішенні інженерної задачі модифікації конструкції внутрішньої будови сопла у взаємозв'язку з вирішенням наукової задачі чисельного моделювання й оптимізації гідродинамічних потоків усередині сопла для повного усунення шкідливих явищ і забезпечення стабільності струменя на виході із сопла.

Мета розробки полягала в забезпеченні заданих гідродинамічних режимів подачі робочої рідини в зону обробки для двох послідовних технологічних процесів – ЕЕВОДЕ та ЕХРОДЕ шляхом модифікації конструкції сопла на основі проведених розрахунків його роботи.

Модифіковане сопло (рисунок 2.4) для послідовної електроерозійної та електрохімічної дротяної обробки розміщується у верхній камері електроерозійного верстата, яка служить одночасно кришкою сопла 3. Воно складається з внутрішнього формувача потоку 8 та зовнішньої частини 10. У центрі формувача потоку 8 знаходиться канал 6, уздовж якого подається дріт-електрод 5. Робоча рідина через впускний отвір 1 подається до камери 2, звідки через канали 9 проходить у зовнішню частину сопла 10 і далі через вивідні канали 11 під тиском виводиться назовні у вигляді струменя, коаксіально дроту-електроду 5.

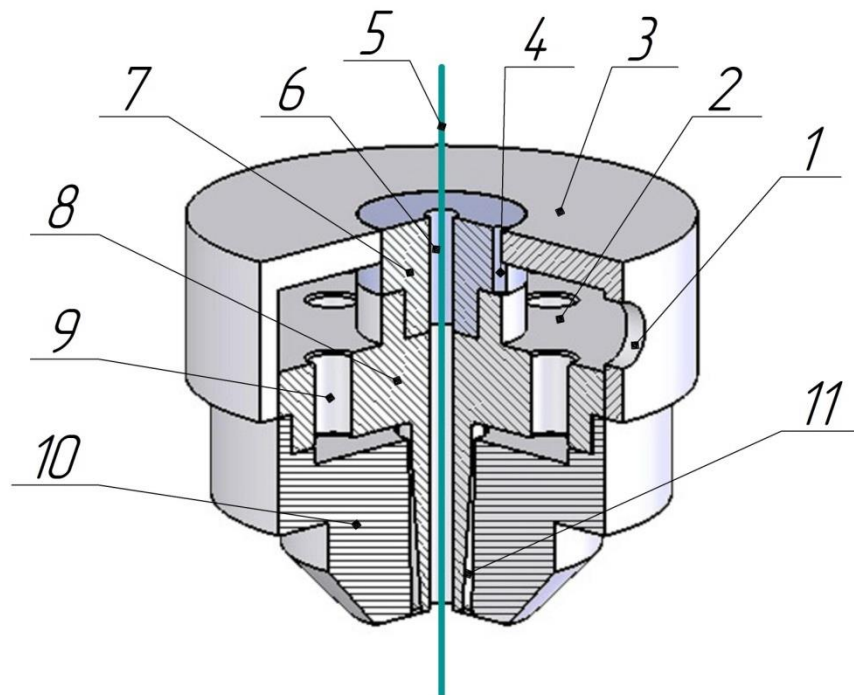


Рисунок 2.4 – Будова сопла: 1 – впускний отвір; 2 – камера всередині сопла; 3 – кришка сопла; 4 – додатковий канал (паз); 5 – дріт-електрод інструмент (ДЕІ); 6 – канал подачі ДЕІ; 7 – змінна вставка з пазом; 8 – внутрішній формувач потоку; 9 – розподільчі канали внутрішнього формувача потоку 8; 10 – зовнішня частина сопла; 11 – канал виходу із сопла

Конфігурація частин сопла, що формують канал виходу 11, створює умови, подібні до режимів роботи струменевих насосів з кільцевим соплом [74, 229]. В результаті явища інжекції повітря через канал 6 затягується в сопло і примусово попадає у вихідний струмінь, порушуючи його стабільність. Моделювання показало, що зміною геометрії вихідних частин сопла в межах дотримання необхідних гідродинамічних параметрів роботи не вдається повністю позбутися інжекції повітря. Тому вирішено провести удосконалення конструкції так, щоб замінити інжекцію повітря на інжекцію робочої рідини. Модифікація сопла полягає в наступному.

Внутрішній формувач потоку комплектується змінною вставкою 7 з додатковим пазом 4. Формувач і вставка з'єднані між собою за допомогою різьби. Це дає змогу використовувати одне сопло для різних тисків з заміною лише вставки 7. Тепер основна частина робочої рідини з камери 2 через канали 9 проходить у зовнішню частину сопла 10 і далі через вивідні канали 11. Інша, значно менша частина рідини під дією тиску виходить через додатковий паз 4 розрахованого поперечного перетину на поверхню кришки 3 і через канал 6 потрапляє в робочу зону, тим самим замінюючи фізичне явище інжекції повітря на інжекцію рідини та уникаючи надмірного розтікання рідини по поверхні кришки 3. Паз служить для вирівнювання тиску рідини в соплі і забезпечує наявність контрольованого об'єму рідини над верхньою кришкою сопла. Величину паза необхідно вибирати залежно від тиску та швидкості руху рідини, що подається в сопло.

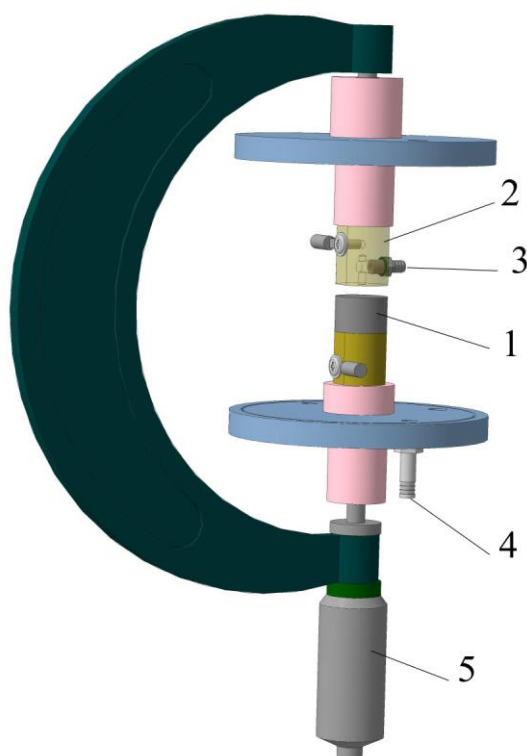
Дослідження гідродинамічних процесів усередині сопла з метою дотримання потрібних режимів формування вихідного струменя для технологій ЕЕВО і ЕХРОДЕ наведено нижче в пункті 4.3.2.

На конструкційне рішення з додатковим каналом розрахованого поперечного перерізу, що повністю усуває інжекцію повітря і стабілізує вихідний струмінь, отримано патент на винахід UA 117497 C2 «Пристрій для подачі робочої рідини в міжелектродний проміжок».

2.1.6 Електрохімічні комірки для досліджень закономірностей анодного розчинення зразків

Для досліджень закономірностей впливу гідродинамічних параметрів потоку електроліту на процеси анодного розчинення циліндричних зразків розроблено та використано електрохімічні комірки. Геометрія електродів підібрана таким чином, щоб забезпечити рівномірний розподіл густини струму на поверхні анода. Тобто кількісний розрахунок об'єму розчиненого матеріалу зводиться до одномірної задачі, яка має точний аналітичний розв'язок.

У першій комірці (рисунок 2.5) з робочою частиною, зображеною на рисунку 2.6, електроліт подається через центральний отвір і рухається до периферії електрода. При цьому швидкість потоку спадає впродовж траєкторії завдяки зростанню площі живого перетину, як свідчать розрахунки при чисельному моделюванні поля швидкостей. Таким чином, за один експеримент отримуємо можливість дослідити електрохімічні процеси розчинення поверхні анода з заданою густиною струму і з різними значеннями швидкості потоку.



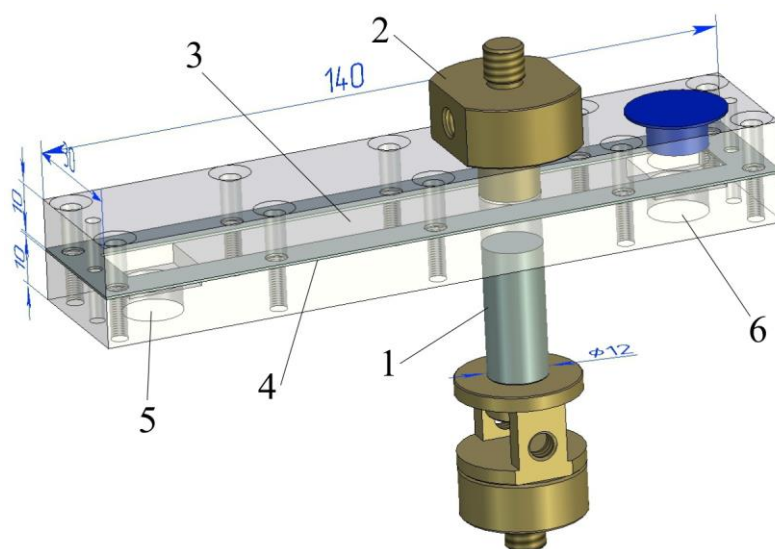


Рисунок 2.7 – Електрохімічна комірка з плоскопаралельним потоком електроліту: 1 – анод; 2 – катод; 3 – канал потоку електроліту; 4 – прокладка на товщину каналу; 5 – вхід потоку; 6 – вихід потоку

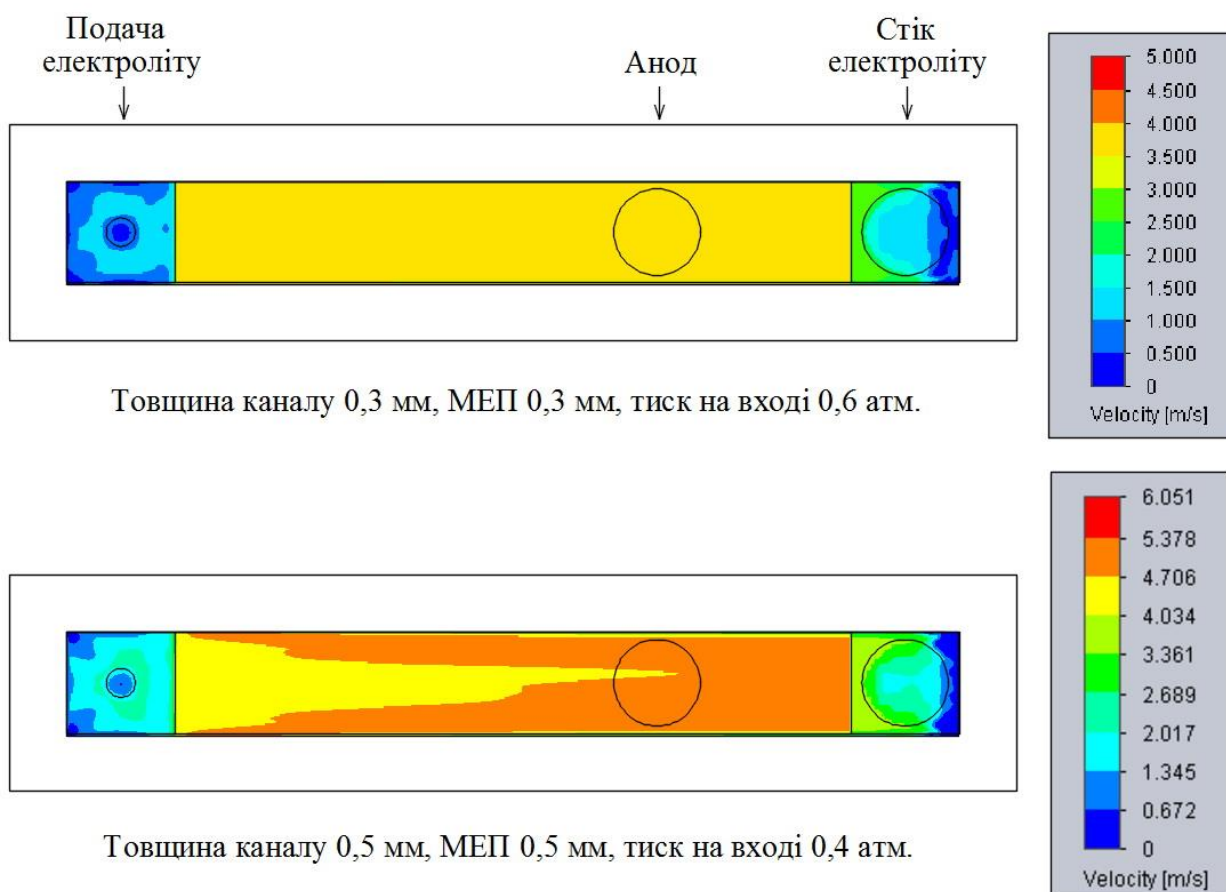


Рисунок 2.8 – Поля швидкостей електроліту в електрохімічній комірці з плоскопаралельною подачею електроліту

Оснастка для закріплення обох комірок, що легко змінювалися залежно від плану експерименту, сконструйована на базі вимірювального приладу – мікрометра (рисунок 2.9). За допомогою мікрометричного гвинта виставлялося точне значення МЕР і проводився контроль товщини розчиненого шару анода.

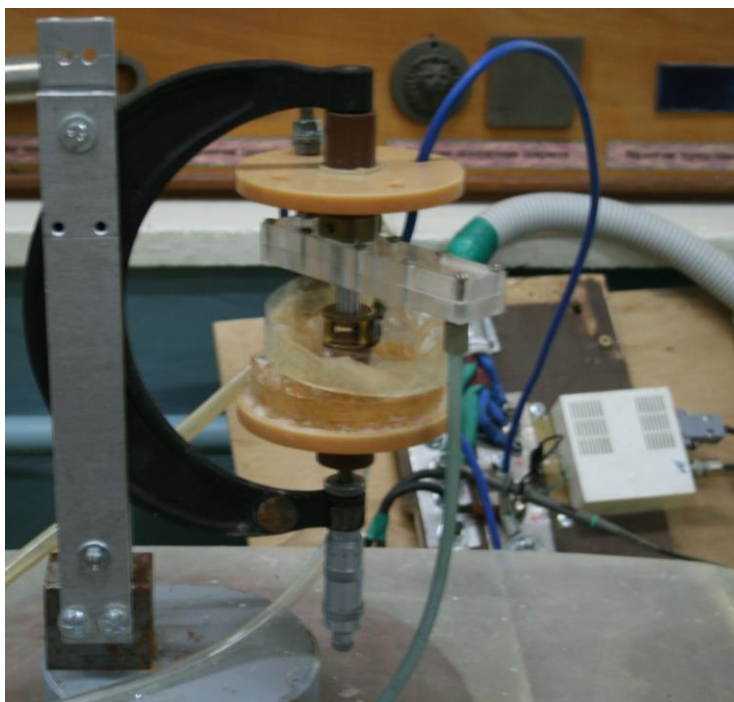


Рисунок 2.9 – Фотографія фрагмента експериментального стенда з електрохімічною коміркою з плоскопаралельним потоком електроліту з мікрометричним регулятором МЕР і підключеними подачею електроліту та джерелом імпульсного струму

2.1.7 Методики та обладнання для контролю електропровідності та температури електролітів

Контроль електропровідності електролітів здійснювався за допомогою кондуктометра-солеміра OAKTON TDS5. Ця модель приладу в комплектації зі штатним електродом, спареним з термодатчиком, дає можливість вимірювати провідність у діапазоні 0 – 20,00 мСм/см. Максимально можлива вимірювана провідність характерна для 1 % концентрації водного розчину NaCl і є недостатньою для типових процесів ЕХРО. Тому використовувався додатко-

вий електрод з більшим коефіцієнтом комірки, що підвищує верхню межу діапазону вимірювання.

Проведено серії юстувальних експериментів і встановлено, що коефіцієнт комірки електрода становить $K = 15,5$. Тобто з його використанням можливо вимірювати провідність водних розчинів солей з концентрацію до 155 г/л (приблизно до 2,3М NaCl) при температурі 32 °С, що перекриває діапазон концентрацій розчинів електролітів для ЕХРО.

Контроль електропровідності здійснювався до початку експерименту, після експерименту і протягом тривалого часу використання електроліту. Дані динаміки зміни електропровідності слугували підставою для визначення якості реновації електроліту в системі подачі чи необхідності його заміни внаслідок забруднення продуктами електрохімічних реакцій і втрати робочих властивостей.

Для проектування технологічного процесу ЕХРО необхідно використовувати в розрахунках значення провідності електролітів, заданого складу, концентрації і температури. За даними літератури [210, 239, 240], побудовано і звірено з експериментами опорні графіки (рисунок 2.10) залежності провідності електролітів NaCl та NaNO₃ від концентрації.

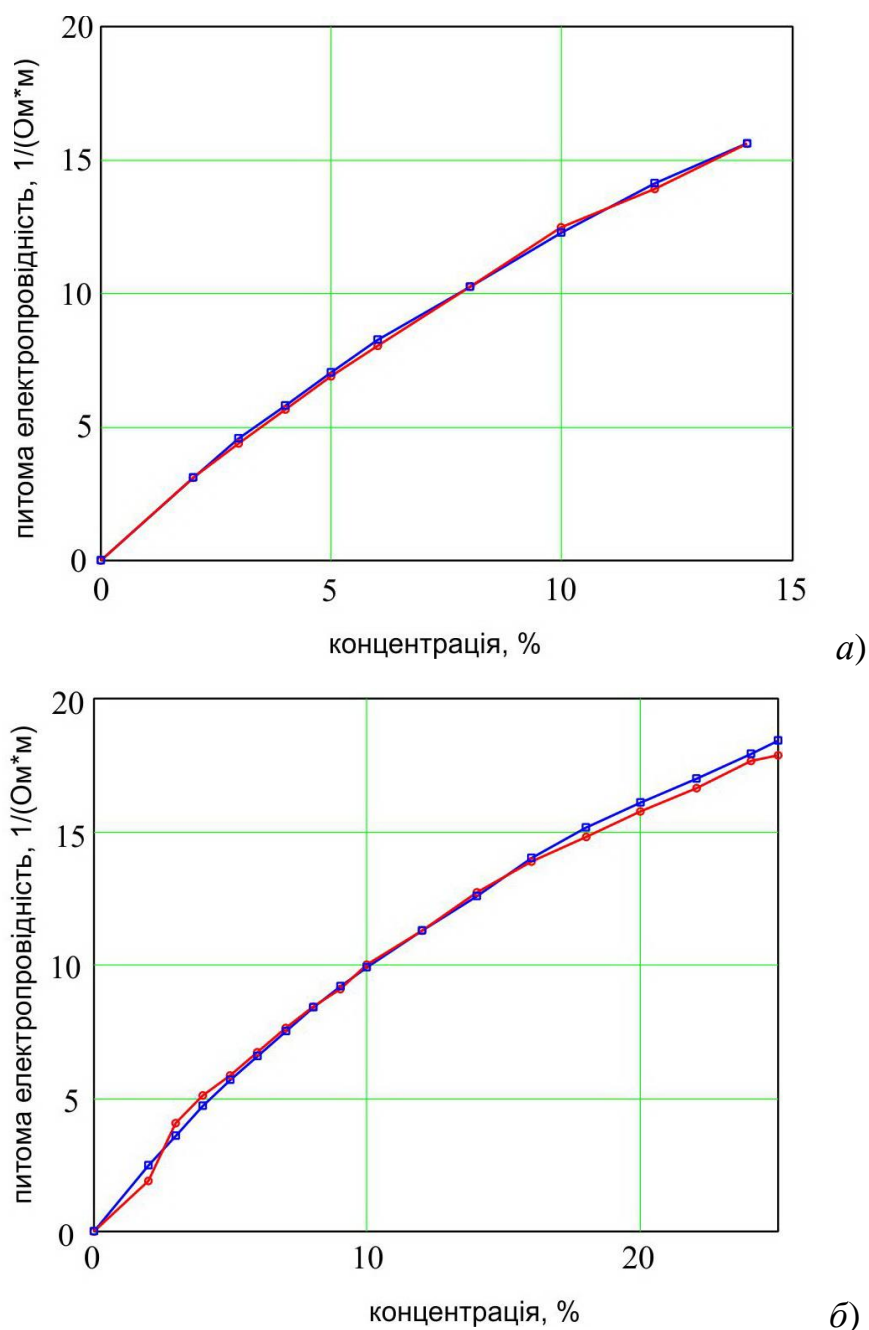


Рисунок 2.10 – Залежність провідності електроліту від концентрації за літературними даними (синя крива), експериментально отримана (червона крива): а) для NaCl за температури 22,6 °C; б) для NaNO₃ за температури 32,6 °C

При зміні температури електроліту перерахунок провідності здійснювався за формулами [210, 239, 240]:

$$\kappa_T = \kappa \cdot [1 + \beta \cdot (T_e - 22,6)] \quad (2.1)$$

для NaCl та

$$\kappa_T = \kappa \cdot [1 + \beta \cdot (T_e - 32,6)] \quad (2.2)$$

для NaNO_3 ,

де κ – значення провідності з відповідного графіка (рисунок 2.10);

$\beta = 0,022$ для солей;

κ_T – провідність електроліту за температури T_e .

Графіки та формули введені в розрахунковий документ MathCAD і використовуються в складі автоматизованого інструментарію для проектування технологічних процесів ЕХРО дротяним електродом.

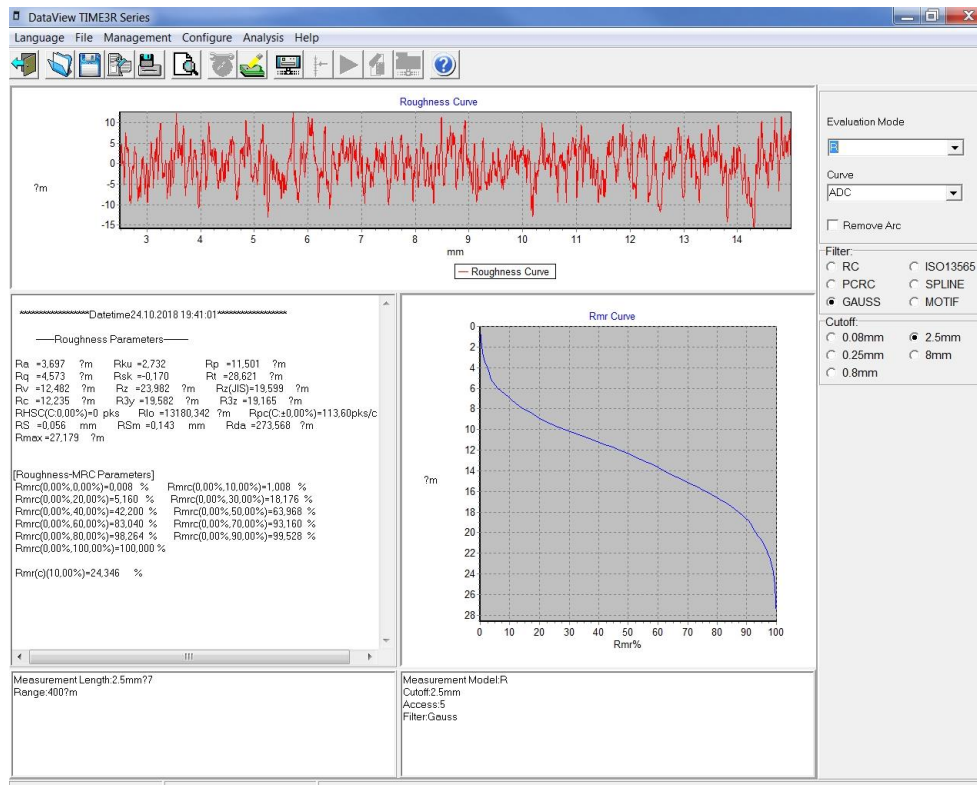
2.1.8 Обладнання, прилади та методики реєстрації параметрів поверхні, отриманої електроерозійним та електрохімічним способами

2.1.8.1 Реєстрація параметрів мікрогеометрії поверхні

Профілографи поверхні після електроерозійної та електрохімічної обробки реєструвалися за допомогою профілографа TIME 3221 (рисунок 2.11, а). Програмне забезпечення дало змогу проводити багатопараметричний аналіз мікрогеометрії поверхні (рисунок 2.11, б).



а)



б)

Рисунок 2.11 – Загальний вигляд профілометра TIME 3221 (а); індикація профілограми та результатів її аналізу у вікні програмного забезпечення DataView TIME3R Series (б)

Основні технічні характеристики профілометра TIME 3221 є наступними. Принцип вимірювання – індукційний. Вимірюваний діапазон – 400 мкм. Роздільна здатність на діапазоні вимірювання ± 50 мкм становить 0,001 мкм, на діапазоні ± 200 мкм – 0,008 мкм. Радіус вістря стилуса – 5 мкм. Матеріал вістря стилуса – алмаз. Прикладена сила при вимірюванні – 4 мН. Кут вістря стилуса – 90° . Радіус кривизни ковзаючої основи – 45 мм. Точність – $\leq \pm 10\%$, повторюваність параметра – $\leq \pm 6\%$.

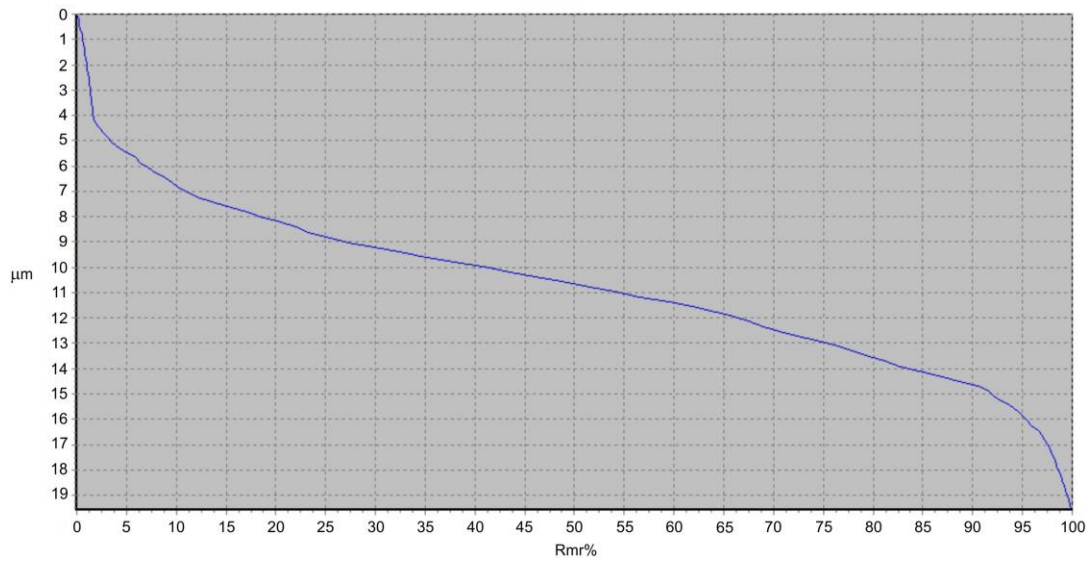
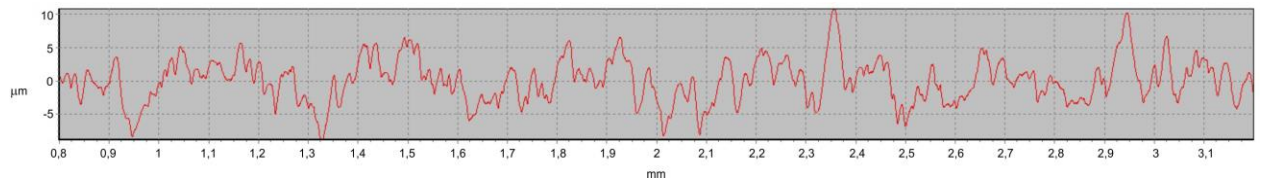
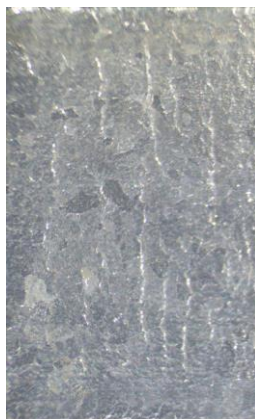
Базова довжина вимірювання вибиралася згідно з табл. 2.4. За один прохід можна здійснити реєстрацію профілю на довжині від 1 до 5 базових довжин, результат вимірювання усереднюється.

Таблиця 2.4 – Рекомендований виробником вибір базової довжини залежно від значень параметрів шорсткості, що вимірюються

Базова довжина	Ra	Rz
0,08 мм	$Ra \leq 0,02$ мкм	$Rz \leq 0,1$ мкм
0,25 мм	$0,02 \leq Ra \leq 0,1$ мкм	$0,1 \leq Rz \leq 0,5$ мкм
0,8 мм	$0,1 \leq Ra \leq 2,0$ мкм	$0,5 \leq Rz \leq 10$ мкм
2,5 мм	$2,0 \leq Ra \leq 10$ мкм	$10 \leq Rz \leq 50$ мкм

Обраховуються 45 параметрів згідно зі стандартами ISO 1997, ANSI і JIS2001. Використовуються методи фільтрування 2RC, GAUSS.

У дослідженнях використовувався багатопараметричний аналіз мікрогеометрії поверхні, зважаючи на те, що використання одного параметра можливе тільки для оцінювання одного типу поверхонь, оброблених одним і тим же методом у тих же умовах. Крім загальновідомих показників шорсткості Ra , Rz , корисним та інформативним для динаміки зміни мікрорельєфу поверхні в процесах електроерозійної та електрохімічної модифікації виявився параметр Rmr – відносна опорна довжина профілю. Так, на рисунку 2.12 зображено поверхні ARMCO заліза після ЕЕО (зверху) і з наступним одним проходом ЕХРО (внизу). Крива Еббота-Файрстоуна, побудована на основі цього параметра, яку називають ще кривою коефіцієнта стійкості до зношення поверхні, свідчить, що після ЕХРО профіль поверхні переходить від гострове-ршинного до платоподібного вигляду. Від’ємне значення параметра асиметричності Rsk після ЕХРО свідчить про хороші опорні властивості поверхні. Зникають пікові виступи. Так, внаслідок ЕЕВО в цьому прикладі отримано 196 піків на сантиметр, а вже після ЕХРО їх 42.

*a)*

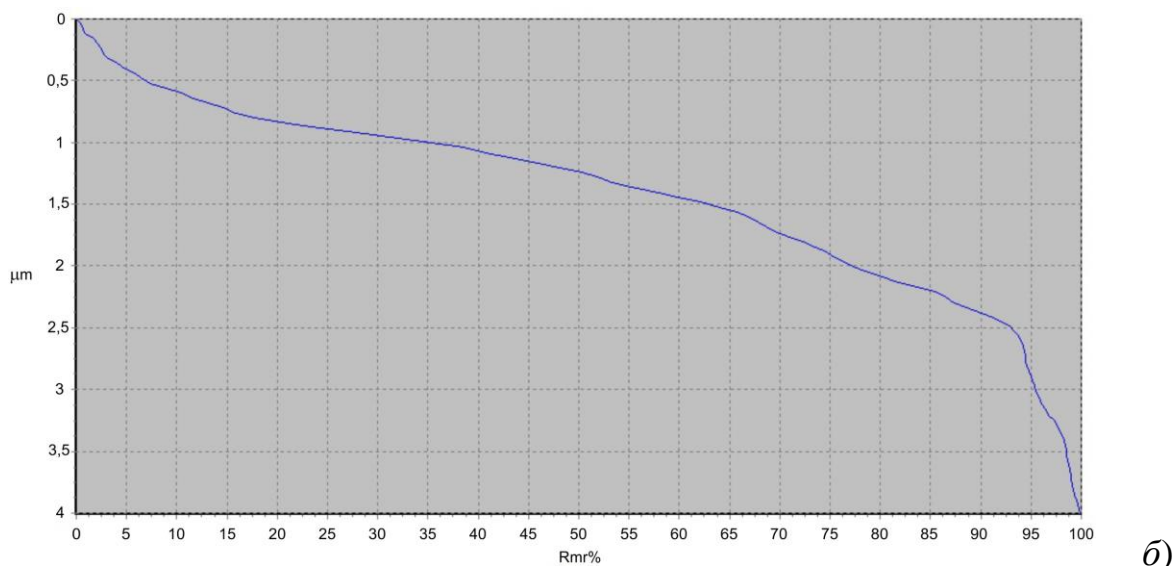


Рисунок 2.12 – Поверхня зразка висотою 12 мм (ARMCO залізо), отримана електроерозійним вирізанням ($a - Ra = 2,72$ мкм, $Rsk = 0,17$, $Rku = 3,3$, $Rpc = 195,8$ pks/cm) і подальшою електрохімічною обробкою дротяним електродом в 1 М NaCl ($б - Ra = 0,64$ мкм, $Rsk = -1,26$, $Rku = 3,64$, $Rpc = 41,7$ pks/cm)

Таким чином, багатопараметричний аналіз профілограм дав змогу встановити характер зміни мікропрофілю поверхні при послідовній електроерозійній та електрохімічній обробці.

2.1.8.2 Засоби реєстрації, методика математичної обробки параметрів рельєфу поверхні

Для перевірки теоретичних розрахунків за математичними моделями проводились серії експериментів по визначенню геометричних параметрів канавок, які утворюються внаслідок електрохімічного розчинення металу деталі за нерухомого положення дротяного електрода (рисунок 2.13).

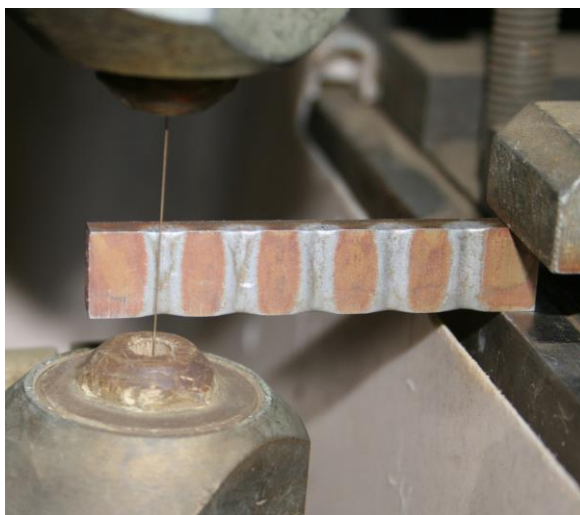


Рисунок 2.13 – Вертикальні канавки, утворені в результаті анодного розчинення з нерухомим дротяним електродом

Для реєстрації параметрів рельєфу поверхні в більшому діапазоні до 1 мм по глибині, ніж може забезпечити профілограф, сконструйовано вимірювальний пристрій (рисунок 2.14, *а*). Підпружинений щуп опускається на поверхню за допомогою електромагнітного приводу. Його переміщення контролюється лазерним тріангуляційним вимірювачем (рисунок 2.14, *б*). В основу роботи вимірювача покладено принцип оптичної тріангуляції. Випромінювання напівпровідникового лазера *1* фокусується об'єктивом *2* на об'єкті *б*. Розсіяне на об'єкті випромінювання об'єктивом *3* збирається на CMOS-лінійці *4*. Переміщення об'єкта *б* - *б'* викликає відповідне переміщення зображення. Процесор сигналів *5* розраховує відстань до об'єкта за положенням зображення світлової плями на лінійці *4*.

Фактично конструкція пристрою нагадує профілометр з безопорним стилусом (щупом). Використовуючи координатний столик під керуванням комп'ютера, реєструвалися координати рельєфу ділянки поверхні в потрібному діапазоні глибин.

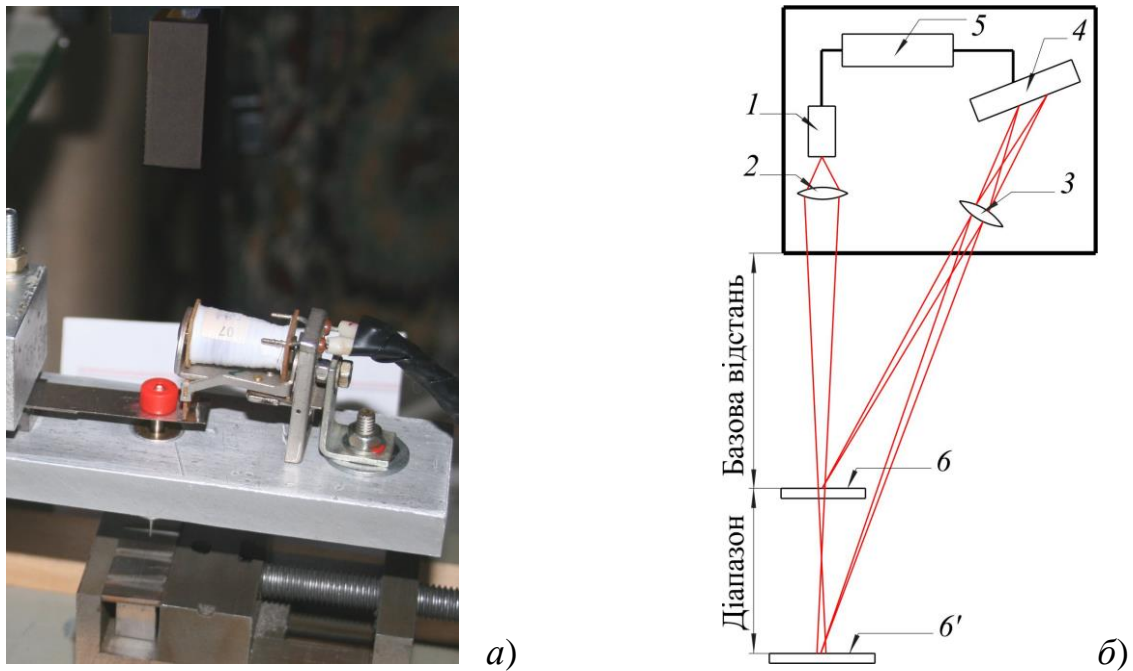


Рисунок 2.14 – Отримання профілограм канавок за допомогою щупа з лазерним вимірювачем: а) пристрій для зняття координат; б) вимірювач лазерний тріангуляційний RIFTEK RF603

Проводилася варіація початкових технологічних параметрів отримання кожної наступної канавки, і за об'ємом видаленого матеріалу та глибиною визначався характер анодного розчинення. Обробка даних і візуалізація рельєфу канавок проводилися за допомогою розроблених програм у середовищі математичного пакета MathCAD наступним чином.

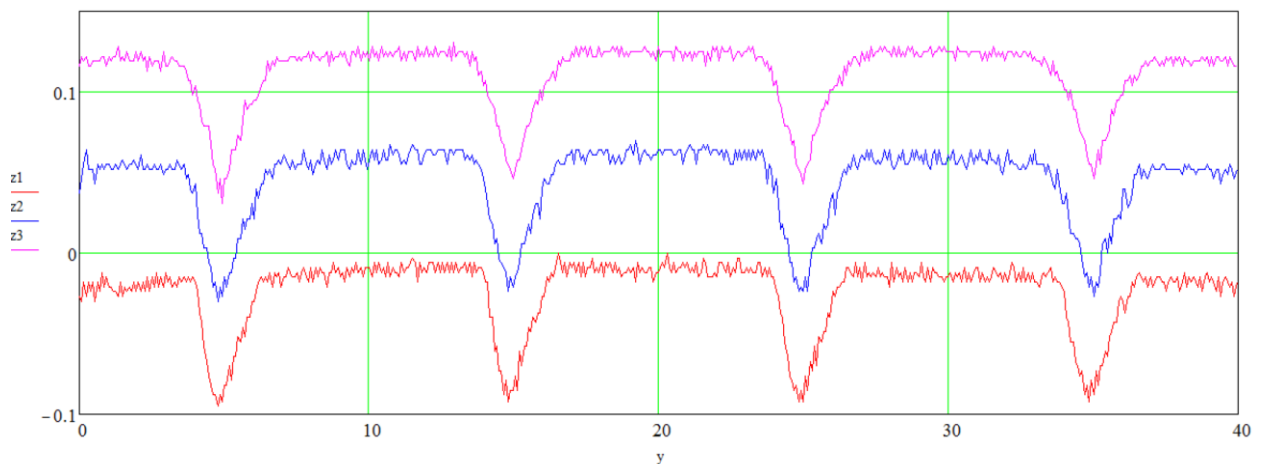


Рисунок 2.15 – Профілограми, зняті у верхній частині канавок (z_1), посередині (z_2), внизу (z_3)

Як видно з рисунка 2.15, поверхня деталі має вигнутий профіль. Тому далі проводиться математична обробка отриманих даних шляхом поділу оригінальних профілограм на ділянки (рисунок 2.16) для наближення середньої базової лінії за методом найменших квадратів та розвороту з візуальним контролем (рисунок 2.17).

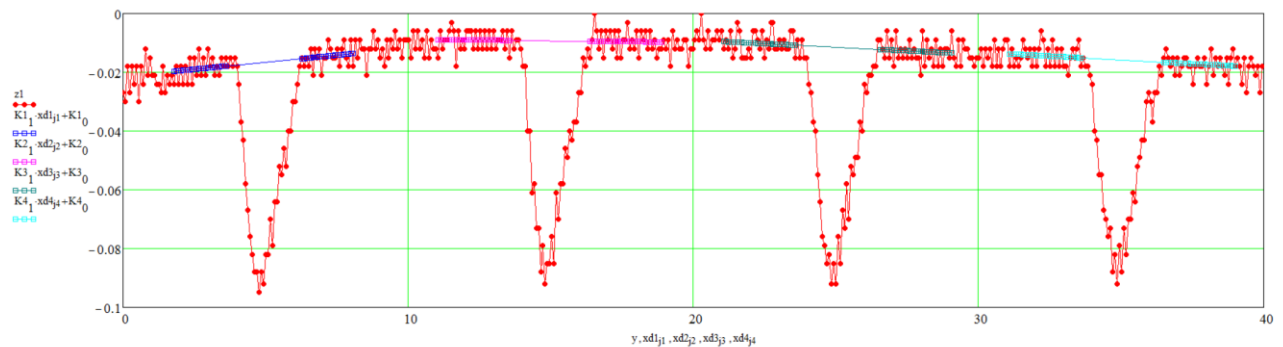


Рисунок 2.16 – Поділ профілограми на ділянки та побудова середньої базової лінії за методом найменших квадратів



Рисунок 2.17 – Профілограми окремих канавок, розвернуті і перераховані відносно базової лінії

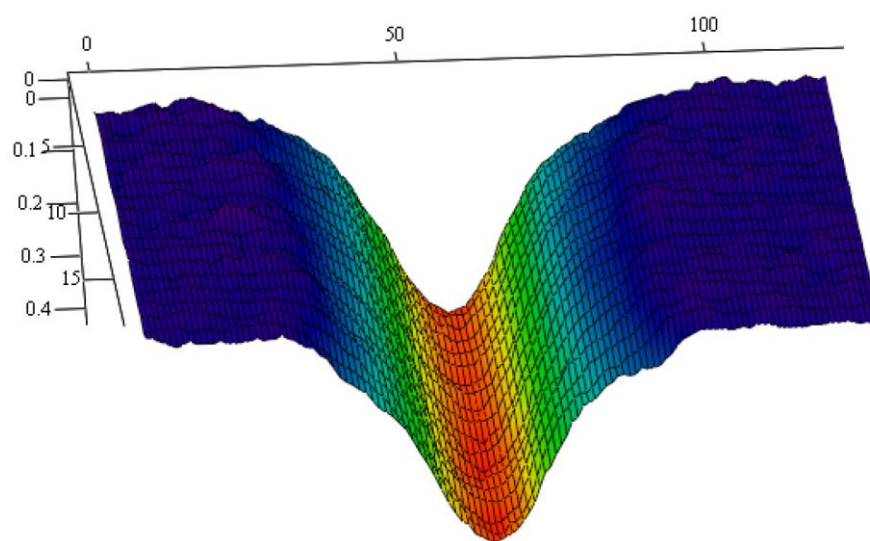
Далі проводиться обрахунок площі поперечного перерізу та глибини канавок за отриманими профілограмами. Дані заносяться в таблицю і проводиться аналіз змін параметрів канавок внаслідок варіації технологічних па-

раметрів електрохімічного розчинення, за яким вони були отримані (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5 – Дані математичної обробки параметрів канавок.

Канавка №	1	2	3	4
Площа перерізу, мм ²	0,094	0,101	0,104	0,098
Зміна площі відносно канавки № 1, %		+7,6	+10,9	+5
Глибина, мм	0,078	0,083	0,081	0,076
Зміна глибини відносно канавки № 1, %		+5,8	+3,1	-2,5

За допомогою пристрою (рисунок 2.14) можна зняти задану кількість профілограм з кожної канавки з заданим кроком по висоті деталі. Тоді отриманий масив даних математично обробляється, за методом найменших квадратів будується базова площина, яка розвертається до горизонтального положення, і відносно неї перераховуються координати знятих точок рельєфу (рисунок 2.18). За аналізом даних рельєфу можливо зробити висновок про стабільність процесу анодного розчинення по висоті деталі, на який суттєвий вплив має рівномірність швидкості потоку струменя електроліту вздовж д्रो-тяного електрода та інші параметри.



a)

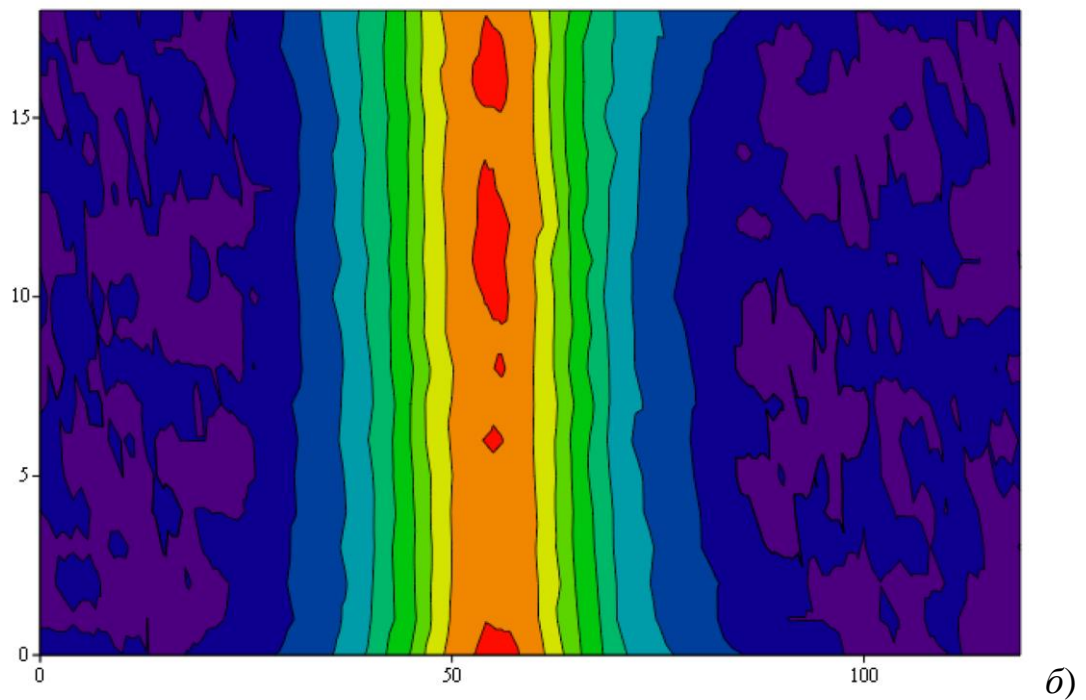


Рисунок 2.18 – Візуалізація результатів математичної обробки даних рельєфу канавки

2.1.8.3 Засоби реєстрації форми поверхні

Відхилення форми виготовленої поверхні від заданої досліджувалося за допомогою координатно-вимірювальної машини Coordinate Measuring Machine 3D CMM AXIOM CNC ABERLINK та відповідного програмного забезпечення. Гранично допустима похибка – $\pm (1,8 + 0,4 \cdot L/100)$ мкм, де L , мм – довжина, що вимірюється.

Знімалися координати точок поверхні шляхом торкання вимірювальним щупом поверхні деталі. Далі в середовищі програмного математичного пакета будувалася задана геометрична форма поверхні, яка найкращим чином за методом найменших квадратів апроксимує отриману хмару точок. Обчислювалися похибки положення в просторі поверхні деталі щодо базових площин деталі, реальні геометричні параметри поверхні деталі, відхилення вимірюваних точок від ідеальної поверхні.

2.2 Розрахунково-експериментальні методики досліджень

2.2.1 Методика визначення реальної форми дротяного електрода внаслідок дії електричних розрядів та гідродинамічних сил

2.2.1.1 Методика визначення показників прогинів дротяного електрода

Експериментальні вимірювання максимальних величин прогинів дротяного електрода проводилися безпосередньо на верстаті. На пробному різі відключалися силові імпульси до МЕР і подавалися на нього низьковольтні малопотужні зондувальні імпульси. Після цього відключалася система промивання, зливалася робоча рідина, і дротяний електрод відводився від стінки паза оброблюваної деталі до зникнення контакту між ними, що фіксувалося приладами верстата. При цьому обчислювалася різниця координат кінцевої точки занурення електрода і точки зникнення контакту. Величина максимального прогину визначалася за виразом

$$f = j - e,$$

де e – величина міжелектродного проміжку;

j – різниця координат точки занурення і точки зникнення контакту.

Величина e визначалася на верстаті за допомогою дотику дротяним електродом стінок оброблюваного паза, також при подачі на дріт малопотужних зондувальних імпульсів.

Таким чином, з похибкою, що не перевищує суми похибок вимірювальної системи верстата і діаметра дроту, вимірювалася величина максимального прогину дротяного електрода.

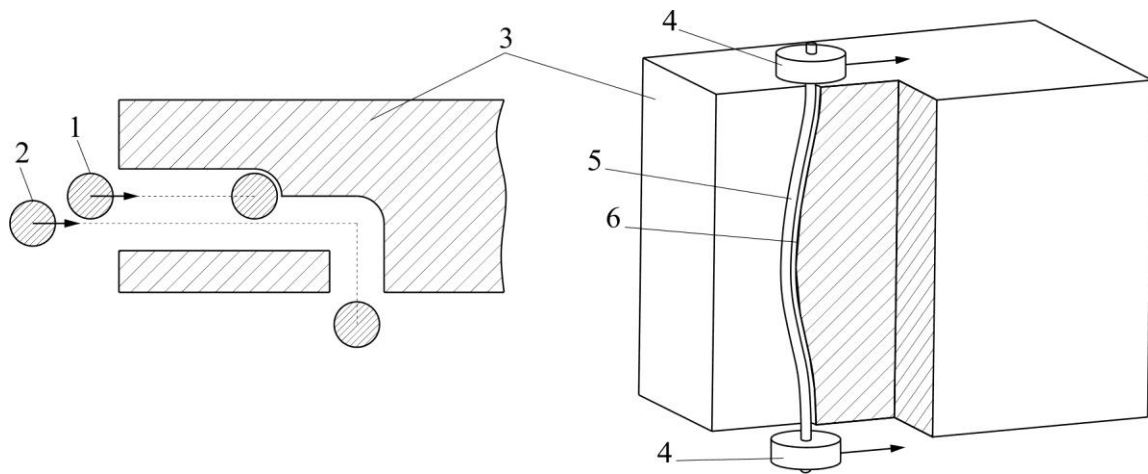


Рисунок 2.19 – Визначення реальної форми прогинів дротяного електрода (масштаб не витриманий): 1 – перший чорновий різ повного знімання; 2 – другий різ зі зміщенням; 3 – заготовка; 4 – напрямні; 5 – дротяний електрод; 6 – лінія прогинів, що вимірюється

Методика визначення повної форми дротяного електрода по всій висоті різучого полягала в наступному (рисунок 2.19). Спочатку проводився чорновий різ повного знімання з максимальною інтенсивністю іскрових розрядів відповідно до обраного технологічного режиму (позиція 1). При певній глибині врізання процес зупинявся. Потім здійснювався другий різ зі зміщенням убік, рівно на половину ширини різучого поля (позиція 2), за допомогою якого відтиналався частина заготовки. В результаті з'являлася можливість вимірювання кромки, що являє собою серединну лінію першого різучого поля. Координати лінії прогинів (позиція 6) знімалися за допомогою двокоординатного вимірювального мікроскопа ДІП-3. Потім здійснювався перерахунок даних у форму дротяного електрода з урахуванням величини міжелектродного проміжку. Оптичне наведення на вимірювану кромку дає змогу визначити координати з похибкою, яка не перевищує $\pm (1,0 + L/200)$ мкм, де L – вимірюваний розмір у міліметрах.

2.2.1.2 Математична модель форми дротяного електрода

Для визначення прогинів дротяного електрода в загальному випадку за чотирикоординатної ЕЕВО використано математичну модель, в якій електрод представлений у вигляді гнучкої нитки (рисунок 2.20), що працює тільки на розтяг, тобто відсутня згинальна жорсткість, і розтягувальні напруження завжди спрямовані по дотичній до нитки.

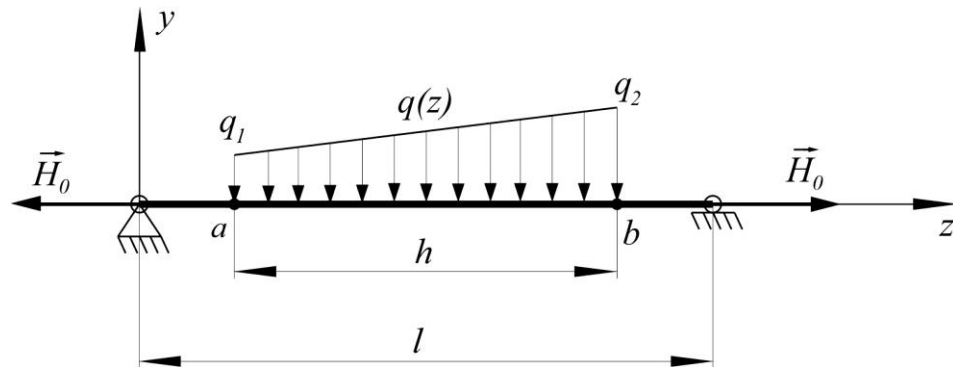


Рисунок 2.20 – Розрахункова схема прогинів дротяного електрода при різних швидкостях руху точок a і b : l – відстань між вузлами фіксації дроту; h – висота оброблюваної деталі; H_0 – натяг на розтяг нитки; $q(z)$ – розподілене поперечне навантаження

Диференціальне рівняння, що описує форму дротяного електрода, має вигляд [236]

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{q(z)}{H_0}. \quad (2.3)$$

Просторово-часовий розподіл іскрових розрядів дає можливість представити сили від дії іскрових розрядів у вигляді розподіленого навантаження з використанням наступного виразу:

$$q(z) = \begin{cases} 0, & z < a; \\ q_1 + \frac{z-a}{b-a}(q_2 - q_1), & a \leq z \leq b; \\ 0, & z > b. \end{cases} \quad (2.4)$$

Зокрема, при $q_1 = q_2$ отримуємо випадок двокоординатної ЕЕВО, коли дротяний електрод рухається без відхилення від вертикального положення.

Розв'язок рівняння (2.3) з урахуванням навантаження (2.4) має вигляд

$$y(z) = \frac{l}{2H_0} \left\{ \frac{z}{l} [q_1((l-a)^2 - (l-b)^2) + \frac{q_2 - q_1}{3(b-a)} ((l-a)^3 - (l-b)^3)] - \right. \\ \left. - q_1((z-a)^2 - (z-b)^2) - \frac{q_2 - q_1}{3(b-a)} ((z-a)^3 - (z-b)^3) \right\}, \quad (2.5)$$

де необхідно покласти $(z-a) = 0$, при $z < a$ і $(z-b) = 0$, при $z < b$.

Формула (2.5) дає можливість розрахувати прогин дротяного електрода в будь-якому довільному перерізі.

Розроблена модель використовувалася в роботі як «обернена задача». Використовуючи експериментально виміряну форму дротяного електрода, з математичної моделі визначалося діюче розподілене поперечне навантаження для конкретних технологічних умов електроерозійного різання.

2.2.1.3 Експериментально-розрахункова методика оцінювання гідродинамічних сил, викликаних потоком рідини для промивки

Більшість розробників електроерозійних вирізних верстатів використовують коаксіальну промивку міжелектродного проміжку для видалення продуктів ерозії із зони обробки та інтенсифікації охолодження дротяного електрода. Застосовуються різні конструкції вбудованих сопел, що забезпечують прокачування робочої рідини, як правило, одночасно знизу і зверху, вздовж осі дротяного електрода. Внаслідок цього виникає поперечне розподілене силове навантаження, викликане гідродинамічним опором дроту потоку робочої рідини промивки. Величина навантаження визначається швидкістю поперечного обтікання дроту і залежить від геометричних параметрів паза, що прорізується, і тиску робочої рідини у верхньому і нижньому плечах гідросистеми верстата.

Силове навантаження, спричинене падінням тиску ΔP між передньою різальною і задньою поверхнями дріт'яного електрода. Втрати напору визначаються за формулою Вейсбаха

$$\Delta P = \xi \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2.6)$$

де $\xi = \frac{33}{Re}$ – коефіцієнт опору прямокутної щілини; Re – число Рейнольдса;

V – швидкість потоку рідини; ρ – густина рідини.

Число Рейнольдса для щілинного зазору можна визначити за формулою

$$Re = \frac{V \cdot C}{\mu}, \quad (2.7)$$

де $C = \frac{\delta \cdot h}{2 \cdot (h + \delta)}$ – відношення площі прохідного перетину до змоченого периметра; δ – мінімальний розмір перетину виходу робочої рідини з міжелектродного проміжку; h – висота різу; μ – кінематична в'язкість робочої рідини.

З (2.6) і (2.7) знаходимо швидкість потоку рідини, що оточує дріт'яний електрод:

$$V = \frac{\Delta P \cdot \delta \cdot h}{33 \cdot (h + \delta) \cdot \rho \cdot \mu}. \quad (2.8)$$

Для експериментального визначення $\Delta P = P_1 - P_2$ використовувався модельний осередок системи промивки (рисунк 2.21).

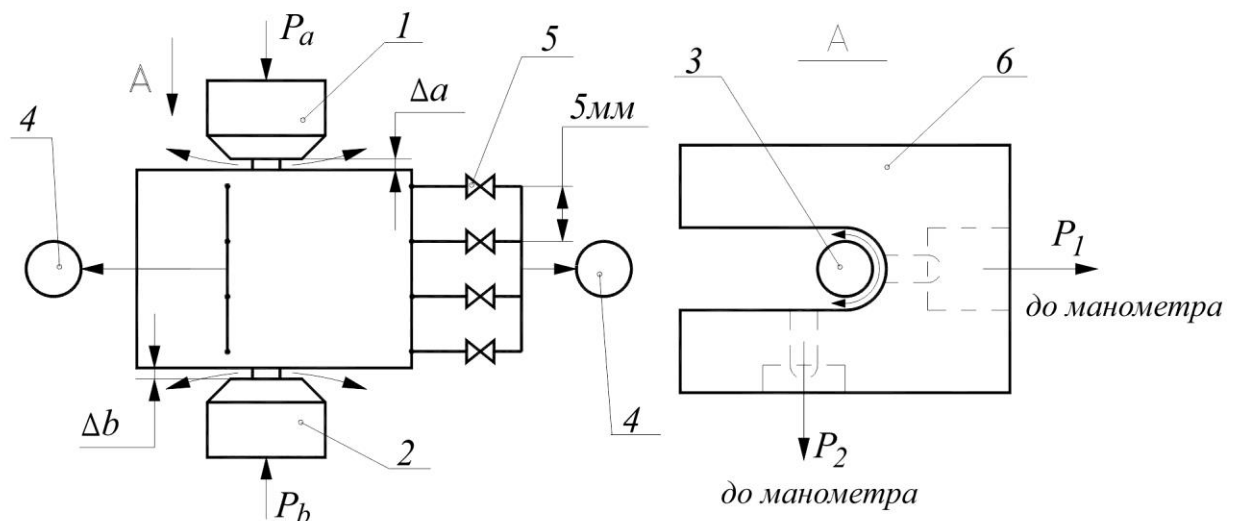


Рисунок 2.21 – Схема вимірювання тиску робочої рідини вздовж довжини паза, що прорізується: 1 – верхнє сопло промивки; 2 – нижнє сопло промивки; 3 – дротяний електрод; 4 – манометри; 5 – вентилі каналів вимірювань; 6 – корпус установки; P_a, P_b – тиск рідини у верхній і нижній системах промивки; P_1, P_2 – тиск у передній частині міжелектродного проміжку і на виході з нього; $\Delta a, \Delta b$ – зазор між соплами промивки і корпусом

Для вимірювання тиску використовувався манометр ІПДЦ-89007 з межами вимірювань від 0 до 10 кПа і допустимою похибкою $\pm 0,07 \%$.

Через блоки вимірювальних каналів реєструвалися робочі тиски рідини P_1, P_2 у різних перетинах уздовж висоти паза, що прорізується. Далі за рівнянням (2.8) можна розрахувати швидкість потоку і витрати рідини, що прокачується через міжелектродний проміжок.

Для тиску промивки $P_a, P_b \leq 8 \cdot 10^5$ Па число Рейнольдса завжди менше ніж $2 \cdot 10^5$. Гідродинамічний опір дротяного електрода можна розрахувати за формулою для циліндра в потоці рідини

$$F_{hydr} = C_x \cdot W \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} = q_0 \cdot h, \quad (2.9)$$

де $W = d \cdot h$ – характерний переріз (мідель дроту), d – діаметр дроту; C_x – коефіцієнт опору циліндра з віссю, перпендикулярною потоку, який для чисел Рейнольдса $Re \leq 2 \cdot 10^5$ приймають рівним 1,2.

Отже, виходячи з формул (2.8), (2.9), можна визначити поперечне розподілене навантаження q_0 , що діє на дротяний електрод:

$$q_0 = 0,6 \cdot d \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot \delta \cdot h}{33 \cdot (h + \delta) \cdot \mu} \right)^2. \quad (2.10)$$

2.2.2 Методика моніторингу стану міжелектродного проміжку шляхом математичної обробки осцилограм напруга – струм

Для ЕЕВО розроблені й успішно використовуються на серійних верстаках експрес-методи попереднього визначення параметрів джерела живлення і

схеми контролю стану МЕП у реальному часі. Апаратно контролюється опір МЕП і при його зменшенні адаптивно змінюються амплітудно-частотні параметри джерела живлення, швидкість приводів подачі верстата зменшується аж до повної зупинки і навіть реверсної подачі. Більш складні сучасні схеми реалізовані шляхом безперервної подачі на МЕП малопотужних діагностуючих імпульсів. За аналізом відгуку на них приймається рішення про вмикання більш потужного джерела імпульсного технологічного струму, який, власне, і здійснює електроіскрову руйнацію матеріалу [66, 214].

Для ЕХРО дротяним електродам подібних методів контролю не розроблено. При електрохімічній обробці з наносекундними імпульсами важливу роль відіграють час періодичного процесу зарядження подвійного шару до перенапруги активації і час розрядження [164, 165]. Циліндричний дротяний електрод зумовлює суттєву нерівномірність розподілу густини струму на верхній анода. Тому невелика зміна потенціалу електрода призводить до великої зміни густини струму і, відповідно, локалізації розчинення. При більшій тривалості імпульсів мікросекундного діапазону лімітуючим фактором виступають дифузійні процеси в МЕП. Тому вибору амплітуди струму повинен передувати розрахунок стаціонарної і перехідної складових дифузійного струму залежно від головних параметрів кожної технологічної схеми РЕСМ [204]. Для конфігурації плоский анод – циліндричний катод зі струменевою подачею електроліту проблематичним є визначення товщини дифузійного шару, яка залежить від розподілу швидкостей електроліту в прианодній зоні. Отже, розрахункові математичні моделі електрохімічних процесів у МЕП є складними, потребують використання САПР і значних затрат обчислювального часу. Вони є достатньо адекватними для попереднього розрахунку параметрів процесів РЕСМ, але не підходять для оперативного моніторингу та адаптивної корекції в реальному часі обробки. Тому існує актуальна необхідність у створенні алгоритмів та схем, придатних для практичної реалізації в діючому технологічному обладнанні.

В основу запропонованого підходу покладено аналіз стану МЕП за осцилограмами відгуку та виявлення закономірностей електрохімічного розчинення із застосуванням еквівалентних електричних схем заміщення. Подібний підхід було застосовано в роботі [213], але було використано складний математичний апарат, не придатний для оперативного кількісного аналізу осцилограм. У подальших роботах [40] проводився тільки якісний аналіз осцилограм.

При використанні розробленої авторами та реалізованої в окремих дослідних зразках технологічного обладнання схеми ЕХРО уніполярними імпульсами струму за рухомого ДЕІ як катода (рисунок 2.2) процес анодного розчинення матеріалу деталі суттєво залежить від величини та динаміки наростання поляризації анода і релаксації його потенціалу за час паузи між імпульсами.

Враховуючи розміри зони омивання взаємодіючих поверхонь електродів, швидкість проходження електроліту через міжелектродний проміжок, стабільність швидкості руху ДЕІ та величини МЕП, електричну еквівалентну схему (схему Рендлса) заміщення межі розділу анод – розчин електроліту можна розглядати у вигляді, зображеному на рисунку 2.22 [191, 213]. Вибір схеми базується на електричних властивостях МЕП. Технологічні параметри в процесі обробки визначають зміну динаміки електричних властивостей МЕП. Швидкість потоку електроліту (швидкість відновлення) впливає на опір електроліту R_E . Зміна величини МЕП, розміру взаємодіючої поверхні під час руху за складною траєкторією контуру деталі впливає на ємність C . Швидкість подачі ДЕІ за траєкторією змінює умови розчинення поверхневих шарів, термічно змінених за ЕЕВО, та впливає на електричні властивості МЕП.

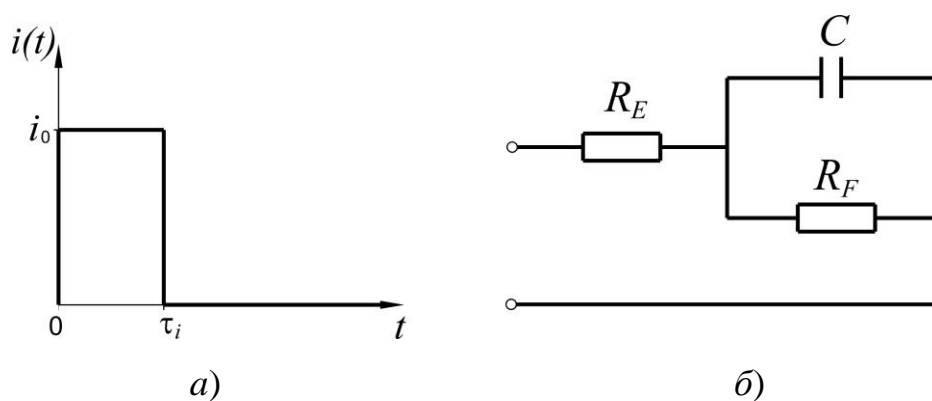
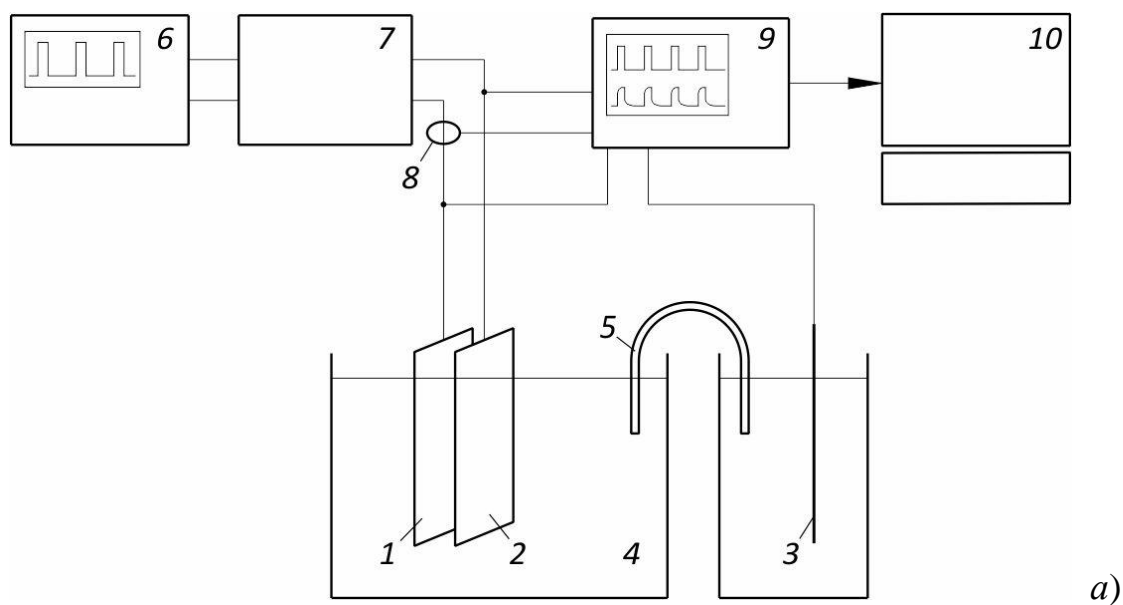


Рисунок 2.22 – Параметри імпульсу струму (а) та еквівалентна схема заміщення межі розділу анод – електроліт при імпульсній ЕХО (б): R_E – опір електроліту; C – ємність подвійного шару; R_F – фарадеївський опір

Методики отримання осцилограм зміни потенціалу анода при збуренні електрохімічної системи послідовністю прямокутних уніполярних імпульсів струму добре відпрацьовані та мають порівняно просту схемну реалізацію (рисунок 2.23) [168, 213].



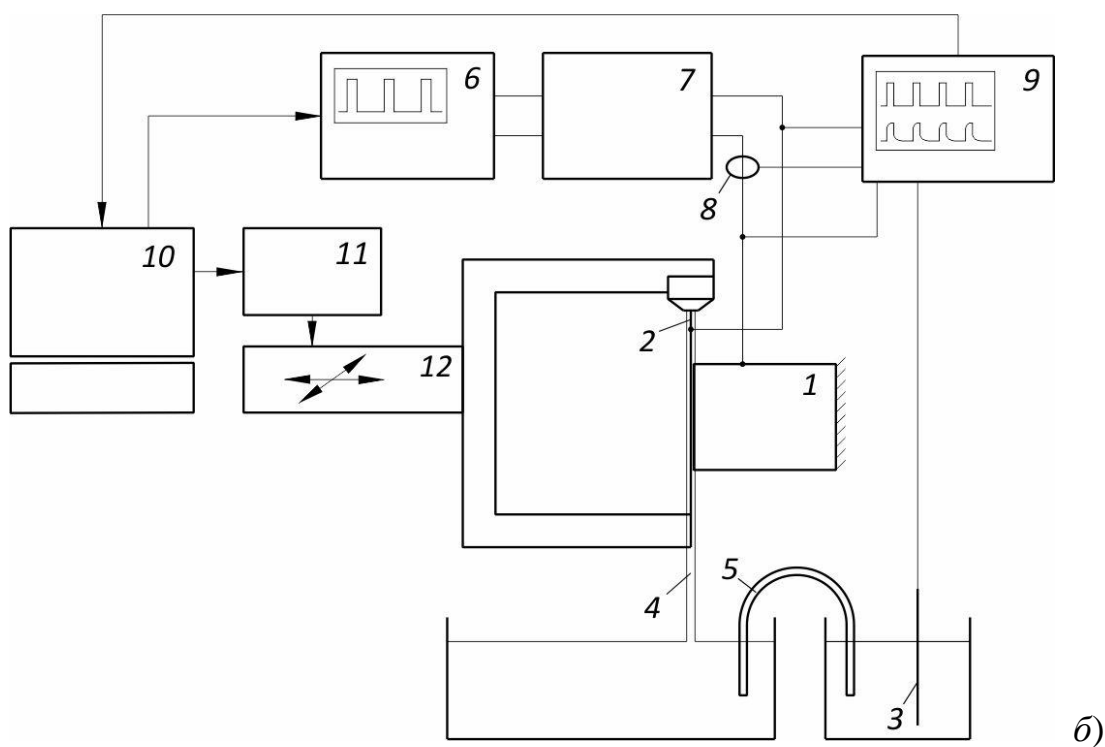


Рисунок 2.23 – Схеми вимірювання: *а)* плоскі електроди; *б)* плоский анод – циліндричний (дротяний) катод; 1 – анод, 2 – катод, 3 – електрод порівняння (платиновий), 4 – електроліт, 5 – електролітичний ключ, 6 – керуючий генератор імпульсів, 7 – джерело струму, 8 – датчик струму, 9 – осцилограф, 10 – комп’ютер з програмним забезпеченням, 11 – стійка числового програмного керування, 12 – позиціонер

Умови експерименту: анод – штампова сталь X12Ф1, катод – дріт діаметром 0,2 мм марки Cobra Cut B (AGIE, Switzerland), матеріал дроту – тверда латунь (CuZn37), електроліт – 1 М NaCl при температурі 25 °С, який подавався у вигляді струменя з верхньої камери верстата під тиском $5 \cdot 10^4$ Па. Висота деталі – 11 мм. Верстат забезпечував рух дротяного електрода із заданою швидкістю за траєкторією на заданій відстані (МЕР) від оброблюваної поверхні. Провідність електроліту контролювалася приладом Oakton TDS-5/CON-5 зі спеціальним електродом, який розширює шкалу вимірів (коефіцієнт комірки $K = 15,5$). Залежності поляризація – час та струм – час фіксувалися цифровим двоканальним осцилографом марки Atten ADS1000 і передавалися на комп’ютер для обробки в математичному програмному пакеті.

Попередню апробацію запропонованого способу моніторингу МЕП було проведено за дослідженнях перехідних процесів в електрохімічній системі. Використовувалися нерухомі плоскі електроди, і процес проводився шляхом проходження послідовності прямокутних імпульсів струму. Електроди розміром 20x12,5x1,5 мм були занурені у ванну з нерухомим 1 М NaCl електролітом, площа взаємодії електродів становила 2,5 см². Матеріал анода – штампова сталь Х12Ф1, катод – латунь Л63.

Розроблено математичний апарат розрахунку параметрів електричного контуру при його навантаженні мікросекундними імпульсами струму.

Як відомо, струм $i(t)$ та напруга $u(t)$ на кінцях елемента електричної ланки з активним опором R та ємністю C зв'язані співвідношенням [225]

$$u(t) = R \cdot i(t), \quad u(t) = \frac{1}{C} \left[\int_0^t i(t) dt + q_0 \right], \quad (2.11)$$

де q_0 – початковий заряд на обкладинках конденсатора.

Використовуючи операційний метод [225], введемо зображення за Лапласом: $F(p) = \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-pt} dt$ «операторного струму» $i(t) \rightarrow I(p)$ та «операторної напруги» $u(t) \rightarrow U(p)$. Тоді співвідношення (2.11) перейдуть в операторні співвідношення:

$$U = RI, \quad U = \frac{1}{C \cdot p} I, \quad (2.12)$$

якщо вважати $q_0 = 0$.

Співвідношення (2.12) об'єднують в «операторний закон Ома»

$$U = ZI, \quad (2.13)$$

де Z – «операторний опір» – імпеданс, який у випадку активного опору та ємності має вигляд

$$Z_R = R, \quad Z_C = \frac{1}{C \cdot p}. \quad (2.14)$$

Враховуючи правила додавання опорів при паралельному та послідовному підключенні для схеми (рисунк 2.22, б), отримаємо вираз для загального опору ланки

$$Z = R_E + \frac{R_F}{C \cdot p \cdot R_F + 1} \quad (2.15)$$

і, відповідно, операторне рівняння

$$U = \left(R_E + \frac{R_F}{C \cdot p \cdot R_F + 1} \right) \cdot I. \quad (2.16)$$

Аналогічно можна сформулювати операторне рівняння для більш складних електричних схем заміщення з урахуванням додаткових складових міжелектродного проміжку – ємності подвійного електричного шару катода, опорів пасивуючих плівок, які можуть утворюватися на поверхні електродів, та ін. Також у схему заміщення можуть бути введені індуктивності, якщо на осцилограмах відгуку, знятих з МЕП, явно простежуються коливальні затухаючі сигнали, і модель повинна їх відтворювати. Важливим є обґрунтування відповідності кожного елемента електричної схеми і способу його підключення реальним фізичним чи хімічним елементам та процесам, що відбуваються в МЕП під час електрохімічної обробки.

Для побудови математичного опису проходження імпульсу струму прямокутної форми через модель електрохімічної комірки (рисунк 2.22, б) розглянемо спочатку задачу про вмикання постійного струму i_0 в момент часу $t = 0$

$$i(t) = i_0 \eta(t), \quad \eta(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } t < 0, \\ 1, & \text{if } t \geq 0; \end{cases}$$

$\eta(t)$ – функція Хевісайда.

Операторний струм: $I = i_0 \frac{1}{p}$. Операторна напруга згідно з (2.13) та

(2.16)

$$U = \left(R_E + \frac{R_F}{C \cdot p \cdot R_F + 1} \right) \frac{i_0}{p}. \quad (2.17)$$

Перейдемо до оригіналу $u(t) \rightarrow U(p)$, використавши наслідок другої теореми розкладу [225], за формулою

$$\frac{A(p)}{pB(p)} \rightarrow \frac{A(0)}{B(0)} + \sum_{k=1}^{k=l} \frac{A(p_k)}{p_k B'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (2.18)$$

де p_k – k -тий корінь рівняння $B(p) = 0$.

У нашому випадку за формулою (2.17) маємо тільки один корінь $p_1 = -\frac{1}{C \cdot R_F}$. Тому за формулою (2.18)

$$\frac{A(p)}{pB(p)} \rightarrow (R_E + R_F)i_0 - R_F i_0 e^{p_1 t}.$$

Отже,

$$u(t) = i_0 [R_E + R_F (1 - e^{p_1 t})]. \quad (2.19)$$

Далі для отримання функції відгуку на проходження імпульсу струму прямокутної форми $i(t) = i_0 \eta(t) - i_0 \eta(t - \tau_i)$, де τ_i – тривалість імпульсу, використаємо теорему запізнення [225]. Отримаємо

$$u(t) = i_0 \{ [R_E + R_F (1 - e^{p_1 t})] \eta(t) - [R_E + R_F (1 - e^{p_1 (t - \tau_i)})] \eta(t - \tau_i) \}. \quad (2.20)$$

Тут прийнято припущення, що параметри електрохімічної комірки R_E, R_F, C не змінилися протягом часу дії імпульсу.

Для серії імпульсів струму з довільними часовими параметрами тривалості та сквапності (рисунки 2.24) доцільно використовувати наступний вигляд функції відгуку:

$$\begin{aligned} u(t) = i_0 \{ & [R_1 + R_2 (1 - e^{p_1 t})] \eta(t) - [R_3 + R_4 (1 - e^{p_2 (t - t_1)})] \eta(t - t_1) + \\ & + [R_5 + R_6 (1 - e^{p_3 (t - t_2)})] \eta(t - t_2) - [R_7 + R_8 (1 - e^{p_4 (t - t_3)})] \eta(t - t_3) + \\ & + [R_9 + R_{10} (1 - e^{p_5 (t - t_4)})] \eta(t - t_4) - [R_{11} + R_{12} (1 - e^{p_6 (t - t_5)})] \eta(t - t_5) + \\ & + \dots \}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

де за тенденцією зміни параметрів від R_1, R_2, C_1 до R_3, R_4, C_2 , далі до R_5, R_6, C_3 і т. д. можна чітко відстежити динаміку показників стану МЕП як електрохі-

мічної комірки в процесі роботи імпульсним струмом при гальваностатичному режимі.

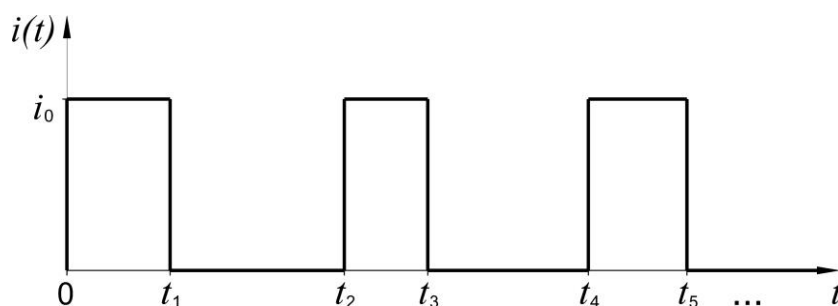


Рисунок 2.24 – Серія імпульсів струму з довільними часовими параметрами тривалості та сквапності

Апробація запропонованого математичного апарату проводилася при дослідженнях перехідних процесів в електрохімічній системі за її збурення послідовністю прямокутних імпульсів струму.

На рисунку 2.25 зображено результати вимірювань динаміки анодної поляризації при заданих амплітудно-часових параметрах струму. Слід зазначити, що амплітуда імпульсів струму і площа взаємодії електродів у цьому експерименті не відповідають робочим режимам густини струму електрохімічного розчинення за комбінованої технології ЕЕВО та ЕХРО дротяним електродом. Умови електричного навантаження комірки і її будова підбиралися таким чином, щоб максимально проявилися параметри опору та ємності МЕР у характері кривої анодної поляризації. Крім того, осцилограми фіксувалися на початку процесу розчинення з метою мінімізації впливу сторонніх чинників, таких як зашламованість і загазованість МЕР, різноманітні плівки на електродах, які ще не встигали з'явитися за короткий час.

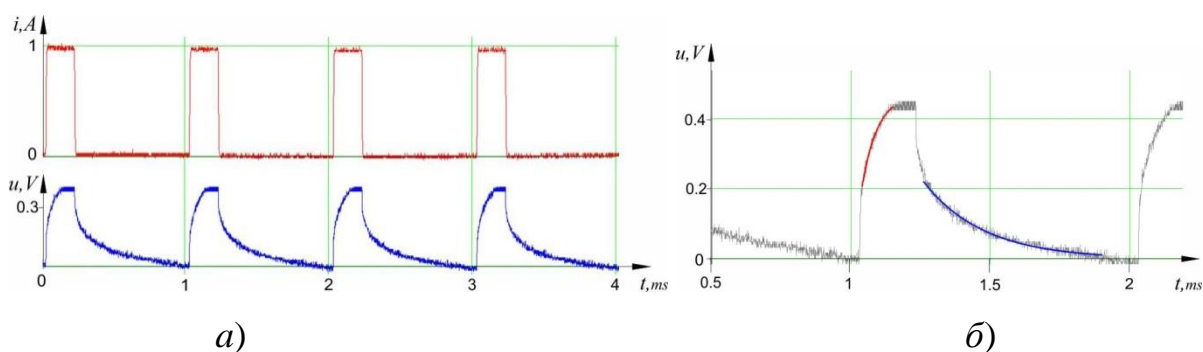


Рисунок 2.25 – Осцилограми та їх математична обробка: а) прямокутні імпульси струму (червона крива), зростання та спадання анодної поляризації (синя крива); б) апроксимація функцією відгуку $u(t)$ ділянок з перехідними процесами

Далі розв'язувалася фактично обернена математична задача – за експериментально отриманим графіком залежності поляризації – час шляхом підбору коефіцієнтів у функції відгуку (формула (2.20)) визначалися параметри R_E, R_F, C еквівалентної схеми заміщення електрохімічної комірки. Ділянка наростання поляризації (рисунок 2.25, б) апроксимувалася за методом найменших квадратів функцією (2.19), що являє собою функцію відгуку при проходженні переднього фронту імпульсу струму через електрохімічну комірку. Ділянка спадання, яка відповідає задньому фронту вимкнення імпульсу струму, апроксимувалася функцією, представленою другим доданком у формулі (2.20).

За результатами обробки осцилограми (рисунок 2.25, б) встановлено, що на момент проходження переднього фронту імпульсу струму параметри МЕР мали такі значення: $R_E = 0,12 \text{ Ом}$, $R_F = 0,33 \text{ Ом}$, $C = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$, на момент проходження заднього фронту: $R_E = 0,12 \text{ Ом}$, $R_F = 0,4 \text{ Ом}$, $C = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$. Розрахований загальний опір МЕР за законом Ома

$$R = \frac{\delta}{\kappa \cdot S} \quad (2.22)$$

з використанням значень провідності електроліту $\kappa = 8,61 \text{ См/м}$, площі взаємодії електродів $S = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ і величини МЕР $\delta = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ становить $0,37 \text{ Ом}$. Питома ємність подвійного електричного шару – $0,48 \text{ Ф/м}^2$ і $1,7 \text{ Ф/м}^2$ у першому і другому випадках відповідно. За літературними даними, ємність має бути в межах $0,2\text{-}0,4 \text{ Ф/м}^2$ [202] (модель Гельмгольца) або $0,4\text{-}0,5 \text{ Ф/м}^2$ [221] (виміряна на межі розділу ртутного анода і розчину 1 М NaCl при 25°C , $0 < U < 0,4 \text{ В}$). Тобто порядок значень опорів $R_E + R_F$ (при послідовному вмиканні додаються) збігається з «грубим» розрахунком. Знайдене

значення ємності по передньому фронту імпульсу потрапляє в загальновідомий діапазон. По задньому фронту визначена ємність є некоректною (подібне у [213]), очевидно, еквівалентна схема потребує уточнення.

Апроксимація сигналів за осцилограмами виконувалась у роботі з використанням математичного програмного пакета, що є досить зручним для досліджень, але не є принципово необхідним. Обчислювальні експерименти показали, що достатню точність у цьому випадку може забезпечити апроксимація за 3 – 5 точками кривої (фільтрованої від цифрового шуму). Згідно з методом найменших квадратів це означає, що для пошуку невідомих коефіцієнтів необхідно розв'язати систему 3 – 5 лінійних алгебраїчних рівнянь, розв'язок якої можна представити і в аналітичному вигляді. Тобто обчислення зводяться до звичайних операцій множення і додавання, які під силу виконати в реальному часі на мікропроцесорних елементах, що використовуються в сучасних стійках ЧПК для контролю і керування верстатами і технологічними комплексами.

2.3 Математичні методи та моделі, використані в дослідженнях

2.3.1 Математична тривимірна модель теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трифазної задачі теплопровідності

Процеси видалення матеріалу внаслідок дії одиничних іскрових розрядів було чисельно змодельовано за допомогою розв'язку теплової нестационарної осесиметричної задачі Стефана в трифазній постановці.

Розглядалися два рухомі фазові фронти, один із яких внутрішній – між твердою і рідкою фазою матеріалу, другий – зовнішній, між рідкою фазою і областю випаруваного матеріалу (рисунок 2.26).

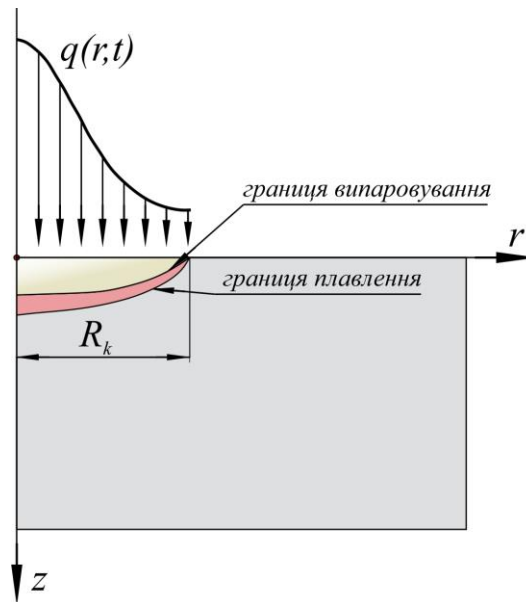


Рисунок 2.26 – Розрахункова схема моделі

У циліндричній системі координат диференціальні рівняння теплопровідності мають вигляд

$$\rho_i(T) \cdot C_i(T) \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_i(T) \cdot r \cdot \frac{\partial T_i}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right], \quad (2.23)$$

де $i = 1, 2, 3$ – індекси температури T і теплофізичних параметрів для, відповідно, твердої, рідкої та газоподібної фаз матеріалу; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $C(T)$ – теплоємність, $\rho(T)$ – густина, t – час.

Початкові умови:

$$T \Big|_{t=0} = T_0. \quad (2.24)$$

Граничні умови:

$$q \Big|_{z=0, r \leq R_k} = q(r, t); \quad (2.25)$$

$$q \Big|_{z=0, r > R_k} = 0. \quad (2.26)$$

Умова (2.26) прийнята на основі припущення про утворення повітряної бульбашки порівняно великих розмірів в околі зони іскрового розряду.

Інші поверхні деталі досить віддалені і приймаються теплоізовльованими: $q \Big|_{\partial p} = 0$.

В подальшому, в ході чисельного розв'язку задачі за методом скінченних елементів на кожному часовому проміжку перебудовується розрахункова сітка, і граничні умови (2.25), (2.26) переносяться на лінію фронту між газоподібною і рідкою фазами.

Практично прийнятий, збіжний результат чисельних розрахунків отримано при застосуванні відомого методу врахування прихованої енергії плавлення і випаровування при переході фазових фронтів, який полягає в згладжуванні розривних в ідеалі функцій ентальпії $H(T)$ та інших теплофізичних параметрів. Так, вважається, що перетворення твердої фази в рідку відбувається в інтервалі температур між $T_{12} - \Delta T/2$ і $T_{12} + \Delta T/2$, де T_{12} – температура плавлення, $\Delta T > 0$ – достатньо мале число.

Тоді в зоні фазового переходу маємо:

$$\rho = \theta \cdot \rho_1 + (1 - \theta) \cdot \rho_2, \quad (2.27)$$

$$\rho H = \theta \cdot \rho_1 \cdot H_1 + (1 - \theta) \cdot \rho_2 \cdot H_2, \quad (2.28)$$

$$\lambda = \theta \cdot \lambda_1 + (1 - \theta) \cdot \lambda_2, \quad (2.29)$$

де $\theta = 1$ при $T < T_{12} - \Delta T/2$, $\theta = 0$ при $T > T_{12} + \Delta T/2$ – деякий аналог функції Хевісайда.

Теплоємність

$$C = \frac{1}{\rho} (\theta \cdot \rho_1 \cdot C_1 + (1 - \theta) \rho_2 \cdot C_2) + C_L, \quad (2.30)$$

де $C_L(T) = (H_2 - H_1) \frac{d\alpha_m}{dT}$; $H_2 - H_1 = L$ – прихована (латентна) енергія плавлення; $\alpha_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 - \theta) \cdot \rho_2 - \theta \cdot \rho_1}{\rho}$ – частка маси.

Майже аналогічно враховується енергія випаровування матеріалу на другому зовнішньому фазовому фронті між рідкою та газоподібною фазами.

Для побудови моделі було використано такі припущення:

- геометрія області прийнята осесиметричною;
- заготовка є гомогенною та ізотропною;
- теплопередача відбувається за рахунок теплопровідності;
- вплив радіації та конвекції не враховується;
- властивості матеріалу заготовки і енергетичні параметри розряду залежать від температури.

У математичній моделі використано джерело тепла, розподіл теплового потоку від якого описується функцією Гауса, аналогічно запропонованому в роботі [71]. Розподіл теплового потоку $q(r,t)$ за умов ЕЕДВ може бути представлений формулою

$$q(r,t) = 4.5 \cdot q_{\tau}(t) \cdot e^{-4.5 \frac{r^2}{R_k^2}}, \quad (2.31)$$

де R_k – радіус дії каналу розряду; r – поточна відстань від центру джерела тепла; $q_{\tau}(t)$ – залежність амплітуди густини теплового потоку від часу дії розряду. Виведення формули (2.31) наведено в пункті 3.2.2.

Залежність амплітуди густини теплового потоку від часу дії розряду можна розрахувати за такою залежністю:

$$q_{\tau}(t) = \frac{k \cdot U(t) \cdot I(t)}{\pi \cdot R_k^2}, \quad (2.32)$$

де k – коефіцієнт, що визначає частку потужності, яка прикладена до заготовки; $U(t)$ – залежність амплітуди напруги від часу дії розряду; $I(t)$ – залежність амплітуди струму від часу дії розряду.

Радіус розряду є важливим показником для достовірності моделювання одиничного розряду. Зміна радіуса розряду приведе до зміни амплітуди густини теплового потоку та, відповідно, до зміни геометричних параметрів одиничної ерозійної лунки. На практиці радіус каналу розряду надзвичайно важко визначити через невелику тривалість розряду.

Для коротких іскрових розрядів час інтенсивного розширення каналу розряду після пробою не перевищує 30 % від тривалості імпульсу ($10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-7}$ мкс). За цей час виділяється близько 15 % від загальної кількос-

ті підведеної енергії. За інші 70 % часу діаметр каналу розряду розширюється не більш ніж на 20 % (при середньому значенні швидкості розширення 10 м/с). Виходячи з цього, можна вважати, що основна частина ерозійного руйнування при ЕЕДВ відбувається при квазісталому діаметрі каналу розряду [233]. Тому в цій моделі було прийнято стале значення радіуса каналу.

На динаміку формування каналу розряду помітно впливають розміри міжелектродного проміжку, умови течії, в'язкість, гідростатичний тиск, наявність на поверхні електрода адсорбційних плівок та інші фактори проходження розряду. Складність процесу утруднює визначення з достатньою достовірністю радіуса розряду. Отже, в роботі радіус каналу обирався шляхом аналізу експериментально отриманих даних (рисунок 2.27).

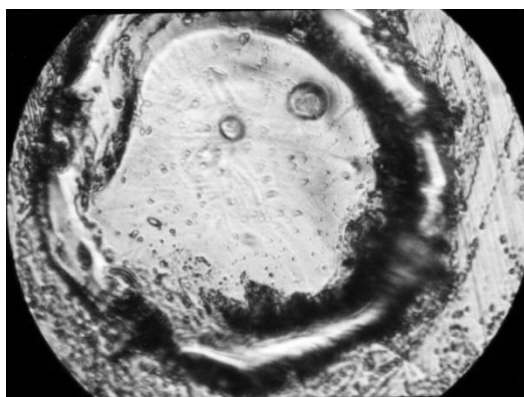


Рисунок 2.27 – Фотографія ерозійної лунки на аноді при обробці Сталі 45 з використанням електроерозійного комплексу AccuteX GE-43SA (пікове значення робочого струму $I_{нік.} = 100$ А, тривалість імпульсу $t_i = 0,8$ мкс) ($\times 1000$)

Розрахувати енергію розряду можливо, використовуючи залежність

$$W_i = \int_0^{t_i} U(t) \cdot I(t) dt. \quad (2.33)$$

Залежність амплітуди напруги та струму від часу можна визначити на етапі введення параметрів генератора імпульсів. Для проведення розрахунків

було використано осцилограми напруги та струму, зображені на рисунку 2.28.

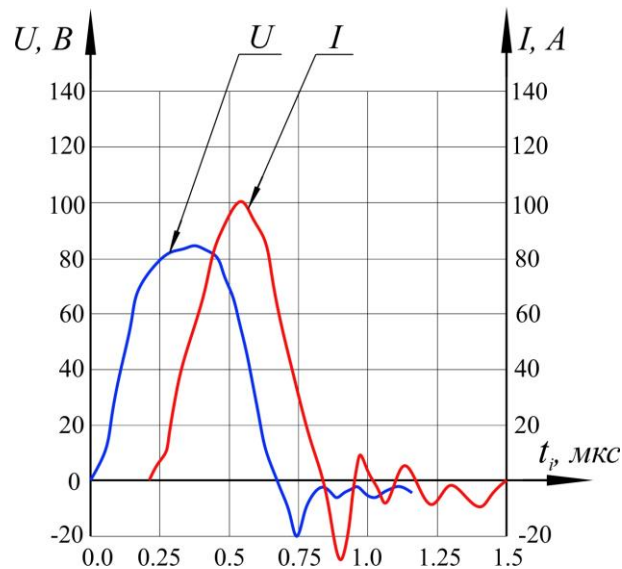


Рисунок 2.28 – Осцилограми струму і напруги одиничних іскрових імпульсів розряду: U – осцилограма напруги розряду; I – осцилограма струму розряду для мГКІ (пікове значення робочого струму $I_{нік} = 100$ А, тривалість імпульсу $t_i = 0,8$ мкс)

Використовуючи формулу (2.33), для кожного з розглянутих імпульсів було виконано розрахунок енергії розряду. Для наведеної осцилограми (рис. 2.28) енергія розряду становила $E_p = 1,67$ мДж.

Однак слід враховувати, що не вся затрачена енергія йде на руйнування матеріалу і утворення електроерозійної лунки. Загальна потужність розряду розділяється на три частини: частина, що підводиться до інструменту, частина, що підводиться до заготовки і частина енергії, що розсіюється в струмені розряду.

Встановлено, що розподіл енергії одиничного іскрового розряду обумовлюється тривалістю розряду, геометричними розмірами МЕР та фізико-хімічними властивостями поверхневих шарів використаної пари електродів (див. розділ 3.1). Всі ці параметри необхідно визначати для конкретного ре-

жиму обробки і враховувати лише частку енергії шляхом вибору коефіцієнта k у формулі (2.32).

Приклад розрахунку теплових полів та форми лунки, сформованої одиничним іскровим розрядом, для матеріалу анода – Сталь 45 зображено на рисунку 2.29.

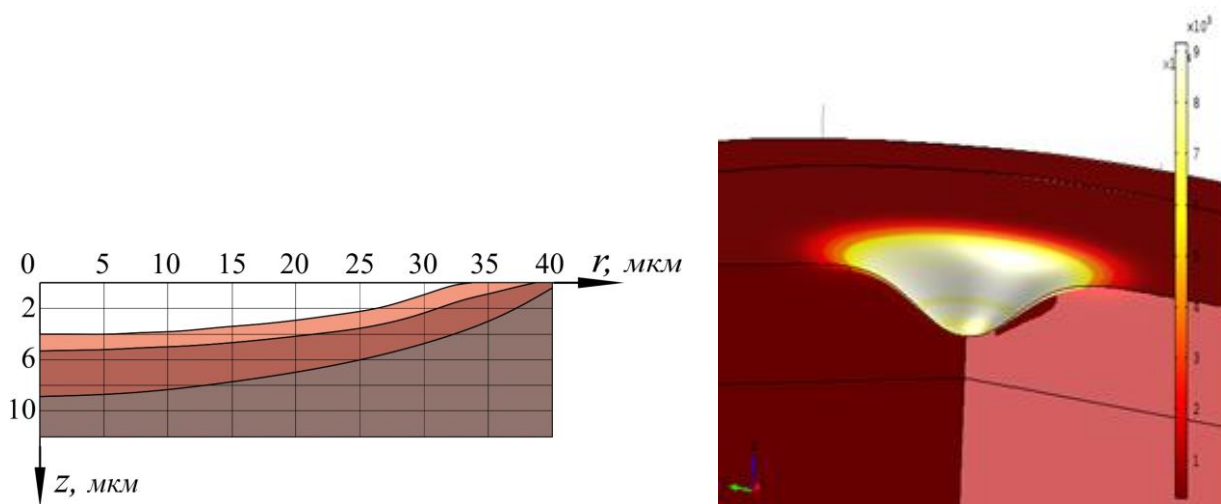


Рисунок 2.29 – Розрахована форма поверхні лунок, сформованих одиничним іскровим розрядом (пікове значення робочого струму $I_{нік} = 100$ А, тривалість імпульсу $t_i = 0,8$ мкс)

Розрахункова модель тестувалася на порівнянні результатів з аналітичними розв’язками одновимірної задачі Стефана для іскрового розряду, що отримані в роботах [218, 219, 234], та розв’язками дво- і трифазних одновимірних задач Стефана, отриманих іншими чисельними методами [235]. При рівних значеннях теплофізичних параметрів матеріалу електрода, тривалості та енергії розряду розходження точних аналітичних розв’язків і значень, отриманих за наведеною моделлю, не перевищують 5 %.

Отже, розроблена математична модель теплової дії одиничного іскрового розряду для умов, характерних при ЕЕДВ, з урахуванням зміни фаз та залежністю теплофізичних властивостей матеріалу від температури дає можливість виконати всебічний тепловий аналіз процесу та оцінити параметри поверхневих шарів деталей після обробки методом ЕЕДВ.

2.3.2 Математична модель розподілу електростатичних полів між циліндричним катодом і плоским анодом на основі теорії функцій комплексного змінного

Розглядається плоске двовимірне електростатичне поле, яке створено зарядами, розподіленими на циліндричних поверхнях таким чином, що силові лінії поля (або лінії струму) скрізь мають напрям по нормалі до твірної [217]. Властивості середовища, в якому створюється поле (діелектрична проникність, електропровідність електроліту), вважаються однаковими в будь-якій точці розрахункової області.

Задача ставиться у фізичній площині $Z = X + iY$, задаються форми анода і катода (рисунок 2.30). Вводиться комплексний потенціал

$$W(Z) = \Phi(X, Y) + i\Psi(X, Y), \quad (2.34)$$

де $\Phi(X, Y)$ – потенціал електричного поля;

$\Psi(X, Y)$ – функція струму.

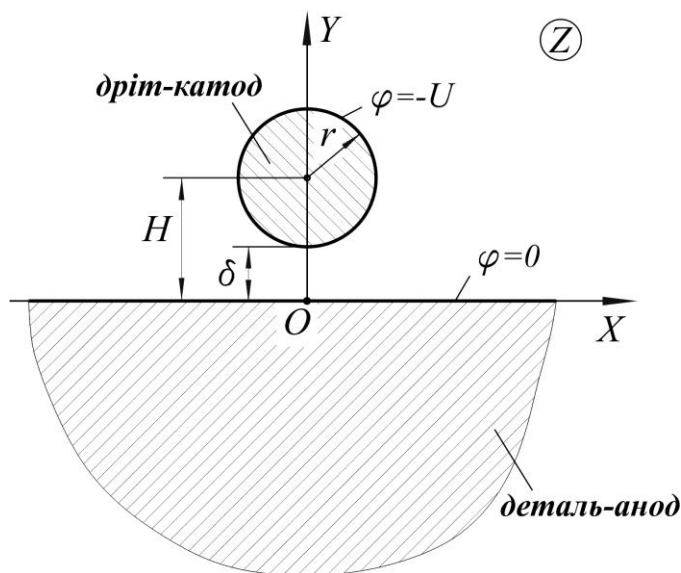


Рисунок 2.30 – Розрахункова схема при електрохімічній обробці плоского анода дротяним катодом

Комплексний потенціал $W(Z)$ повинен задовольняти рівняння Лапласа та граничні умови на аноді та катоді.

Якщо функції $\Phi(X, Y)$, $\Psi(X, Y)$ задовольняють умови Коші-Рімана

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X} = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial Y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}, \quad (2.35)$$

то $W(Z)$ – аналітична функція, задовольняє рівняння Лапласа.

Через функцію $\Phi(X, Y)$ виражається напруженість електричного поля

$$\vec{E} = \text{grad} \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial X} + i \frac{\partial \Phi}{\partial Y} = E_x + E_y = \overline{\frac{dW}{dZ}}, \quad (2.36)$$

тут риска над dW означає комплексне спряження.

Густина струму виражається через \vec{E} за законом Ома

$$\vec{j} = \kappa \vec{E}, \quad (2.37)$$

де κ – провідність електроліту.

Через функцію струму $\Psi(X, Y)$, комплексно спряжену з $\Phi(X, Y)$, виражається весь струм $I = \kappa(\Psi_2 - \Psi_1)$, що проходить між силовими лініями $\Psi = \Psi_1$ та $\Psi = \Psi_2$.

Таким чином, комплексний потенціал $W(Z)$ визначає всі важливі характеристики – напруженість поля, різницю потенціалів, густину струму і загальний струм.

Процес розчинення в кожній точці поверхні анода визначається законом Фарадея

$$\Delta H = K_v \cdot j \cdot \Delta t \cdot \eta = K_v \cdot \kappa \cdot E_n \cdot \Delta t \cdot \eta, \quad (2.38)$$

де ΔH – товщина шару матеріалу анода, знятого за короткий проміжок часу Δt , K_v – коефіцієнт електрохімічного розчинення матеріалу анода, E_n – нормальна до поверхні анода складова вектора напруженості електричного поля, η – вихід по струму, який приймається постійним або функцією густини струму.

Область Z міжелектродного проміжку (див. рисунок 2.30) конформно відображається на область простішої форми – смуга, круг, кільце з параметром σ на границі. Тоді напруженість електричного поля на границі визначається за формулою

$$E = \frac{\overline{dW}}{dZ} = \frac{\overline{\partial W}}{\partial \sigma} \left(\frac{\overline{\partial Z}}{\partial \sigma} \right)^{-1}. \quad (2.39)$$

Для конкретного випадку конфігурації електродів плоский анод – круглий катод (рисунок 2.30), яка являє собою горизонтальний переріз області обробки прямолінійної ділянки дедалі дрітняним циліндричним електродом радіуса r з міжелектродним проміжком δ , знайдемо параметри поля. Граничні умови мають вигляд

$$\begin{aligned} \varphi(x, 0) &= 0, \\ \varphi(x, y) \Big|_{y = H \pm \sqrt{r^2 - x^2}} &= -U, \end{aligned} \quad (2.40)$$

тут $U = U_e - \Delta\varphi$, $\Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_k$; U_e – напруга, що подається на електроди; φ_a , φ_k – електродні потенціали анода і катода відповідно.

Комплексний потенціал має вигляд

$$\varphi = w = \frac{U}{\ln p} \ln(z - ia) - \frac{U}{\ln p} \ln(z + ia), \quad (2.41)$$

$$\text{тут } a = \sqrt{H^2 - r^2}; \quad p = \frac{a - \delta}{a + \delta}.$$

Напруженість поля:

$$\vec{E} = \frac{U}{\ln p} \left(\frac{1}{z - ia} - \frac{1}{z + ia} \right). \quad (2.42)$$

Виділивши дійсну і уявну частини, остаточно отримаємо

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{U}{\ln p} \left(\frac{x}{x^2 + (y - a)^2} - \frac{x}{x^2 + (y + a)^2} \right), \\ E_y &= \frac{U}{\ln p} \left(\frac{y + a}{x^2 + (y + a)^2} - \frac{y - a}{x^2 + (y - a)^2} \right). \end{aligned} \quad (2.43)$$

Густини струму:

$$j_x = \kappa E_x; \quad j_y = \kappa E_y. \quad (2.44)$$

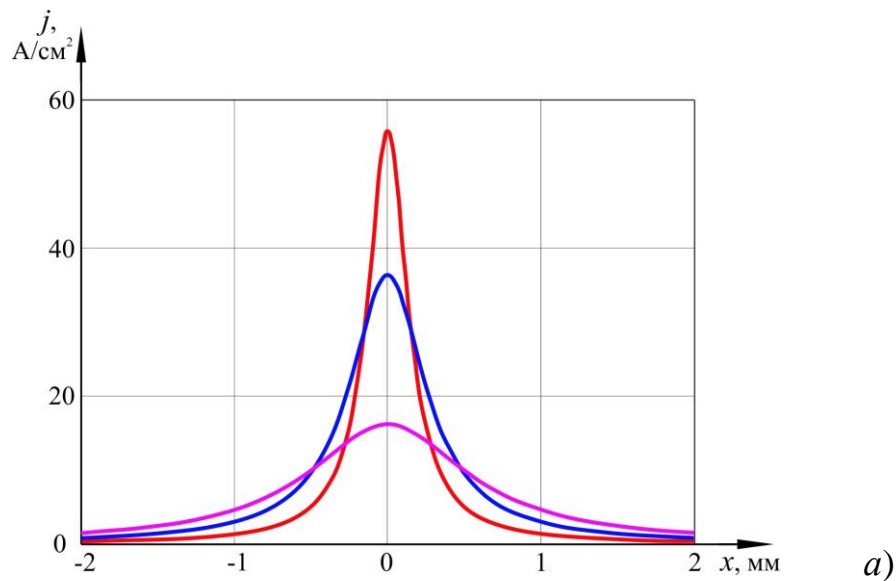
Максимальне значення густини струму на поверхні анода при $x = 0$, $y = 0$

$$j_{\max} = \frac{2U\kappa}{a \ln p}. \quad (2.45)$$

Лінійне знімання матеріалу анода

$$h_x = K_v \cdot j_x \cdot \Delta t \cdot \eta; h_y = K_v \cdot j_y \cdot \Delta t \cdot \eta. \quad (2.46)$$

На рисунку 2.31 зображено приклад розрахунку розподілу густини струму на поверхні анода та форми канавки, що утворюється вглиб деталі внаслідок електрохімічного розчинення. Результати отримані за таких технологічних параметрів: $U = -6$ В, $r = 0,075$ мм, $\delta = 0,1$ мм – червона крива; $U = -8$ В, $r = 0,125$ мм, $\delta = 0,2$ мм – синя крива; $U = -10$ В, $r = 0,15$ мм, $\delta = 0,5$ мм – рожева крива. Питома провідність електроліту $\kappa = 10,96$ 1/(Ом·м), електрохімічний еквівалент матеріалу анода $K_v = 2,87 \cdot 10^{-11}$ м³/Кл. Тривалість дії імпульсу – 2 мс, період імпульсів – 8 мс, час обробки – 90 с. Коефіцієнт виходу за струмом прийнято рівним 1.



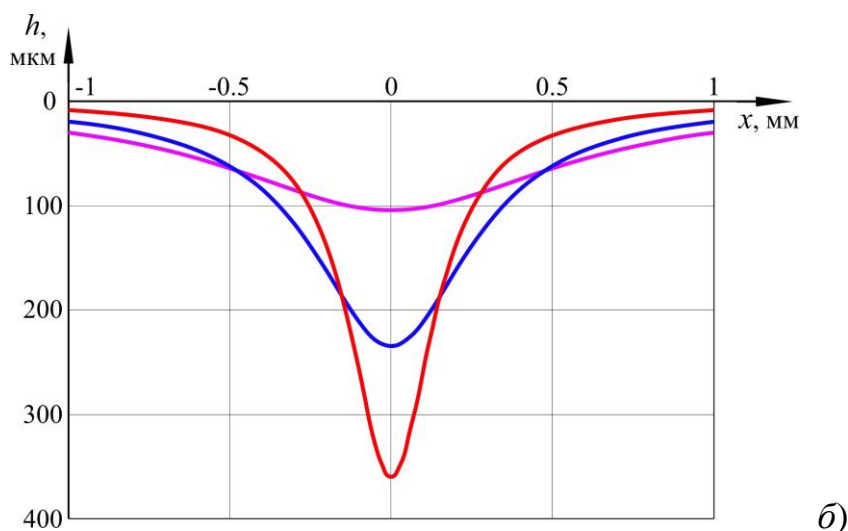


Рисунок 2.31 – Результати розрахунку за математичною моделлю розподілу електростатичних полів між циліндричним катодом і плоским анодом: а) розподіл густини струму на поверхні анода; б) форма канавки

2.3.3 Математична тривимірна модель розподілу електростатичних полів для технологічної схеми дротяний катод – складноконтурний анод

Будемо вважати, що в нашій електрохімічній системі єдині носії зарядів – це іони, і що сольватовані іони та електричне поле не змінюють діелектричну проникність середовища. Перенесення маси носіїв заряду у водних системах зазвичай описується рівняннями Нернста-Планка. Ці рівняння нехтують міжіонними взаємодіями, і тому вони застосовні лише для нескінченно розведеного розчину [231]:

$$\vec{N}_i = -D_i \nabla c_i + c_i \vec{u} - z_i m_i F c_i \nabla \phi_i, \quad (2.47)$$

тут \vec{N}_i – потік іонів i -того виду, D_i – коефіцієнт дифузії, c_i – концентрація іонів, \vec{u} – вектор швидкості, z_i – валентність, m_i – рухливість іонів, F – стала Фарадея, ϕ_i – електролітичний потенціал.

Вектор густини струму виражається через суму потоків іонів усіх видів в електролітичній системі

$$\vec{j} = F \sum_i z_i \vec{N}_i$$

або

$$\vec{j} = F \left(\sum_i -z_i D_i \nabla c_i + \vec{u} \overset{\text{сума зарядів}}{\sum_i z_i c_i} - \nabla \phi \sum_i (z_i)^2 m_i F c_i \right).$$

Якщо електроліт є нейтральним, то сума зарядів дорівнює нулю і тоді залишається

$$\vec{j} = F \left(\sum_i -z_i D_i \nabla c_i - \nabla \phi \sum_i (z_i)^2 m_i F c_i \right). \quad (2.48)$$

Останнє рівняння використовується при розрахунках третинного розподілу струму в електрохімічних системах для збереження нелінійного заряду та/або залежної від концентрації поляризації електрода. Для технологічних процесів електрохімічної обробки, де проходить поверхневе розчинення, перший доданок у дужках рівняння (2.48) може бути проігнорований у зв'язку з припущенням про відсутність зміни концентрації в об'ємі електроліту. Місцеві зміни концентрації в приелектродному дифузійному шарі, характерні для імпульсної електрохімічної обробки, будуть описані в пункті 2.3.6.

Для первинного і вторинного розподілу струму характерним є такий вираз:

$$\vec{j} = - \underbrace{\left(F \sum_i (z_i)^2 m_i F c_i \right)}_{\kappa = \text{провідність}} \nabla \phi. \quad (2.49)$$

або

$$\vec{j} = -\kappa \cdot \nabla \phi, \quad (2.50)$$

де κ – провідність електроліту.

Рівняння (2.50) є, по суті, однією з форм закону Ома, що свідчить про омичний характер транспортування зарядів в електроліті з урахуванням вищезазначених припущень.

Збереження заряду (тобто заряд не накопичується, не виробляється та не витрачається в основному електроліті) описується рівнянням

$$\nabla \cdot (-\kappa \nabla \phi) = 0. \quad (2.51)$$

Останнє рівняння використовується в обох моделях первинного та вторинного розподілу струму. Якщо припускається чи передбачається нескінченно швидка кінетика електродів, що призводить до незначного падіння потенціалу на границях електрод – електроліт, то використовується модель первинного розподілу струму. Якщо кінетика реакції електрода проходить з кінцевою швидкістю, то система має вторинний розподіл струму.

Третинний розподіл струму використовується в області електроаналізу за умови, що градієнти потенціалу в електроліті настільки малі, що просторовий розподіл струму в електроліті вважається неважливим. Такі моделі, навпаки, зосереджені навколо кінетики взаємодії іонів і транспортування (за рахунок дифузії) реагуючих видів іонів в околі електродів.

Для ЕХОДЕ характерні порівняно невеликі значення МЕР (близько 0.1 – 0.5 мм) із застосуванням різниці потенціалів на електродах, більших 2 В. Такі умови гарантують високий рівень градієнтів потенціалу, і визначальним є первинний розподіл струму в МЕР.

Отже, математична модель розподілу електростатичних полів для технологічної схеми дротяний катод – складноконтурний анод реалізується шляхом отримання чисельного розв'язку вищенаведених рівнянь методом скінченних елементів (МСЕ) з урахуванням граничних умов на поверхнях електродів заданої конфігурації.

Для прикладу розглянемо розрахунок електростатичного поля за МСЕ в об'ємній області електроліту з дротяним катодом і анодом у вигляді паралелепіпеда. Розрахункова область у цьому випадку обирається згідно з рисунком 2.32.

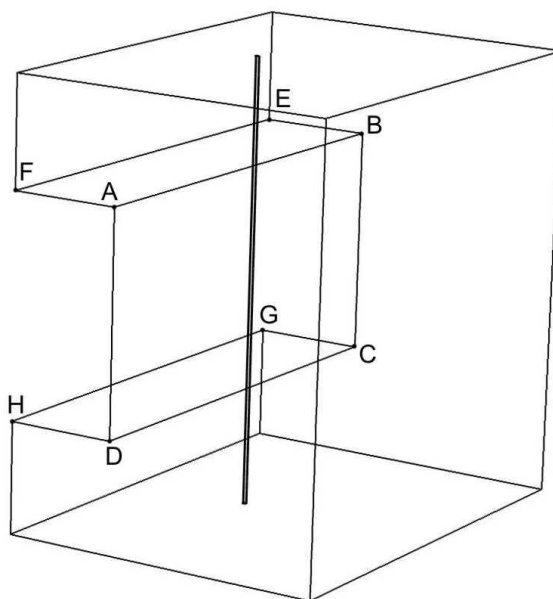


Рисунок 2.32 – Розрахункова область, зайнята електролітом

Граничні умови задаються наступним чином: грані анода – $ABCD$, $ABEF$, $DCGH$ – 0 В ; поверхня дріяного катода – -4 В .

Далі вибирається орієнтація електрохімічної комірки відносно системи координат і будується сітка МСЕ (рисунок 2.33).

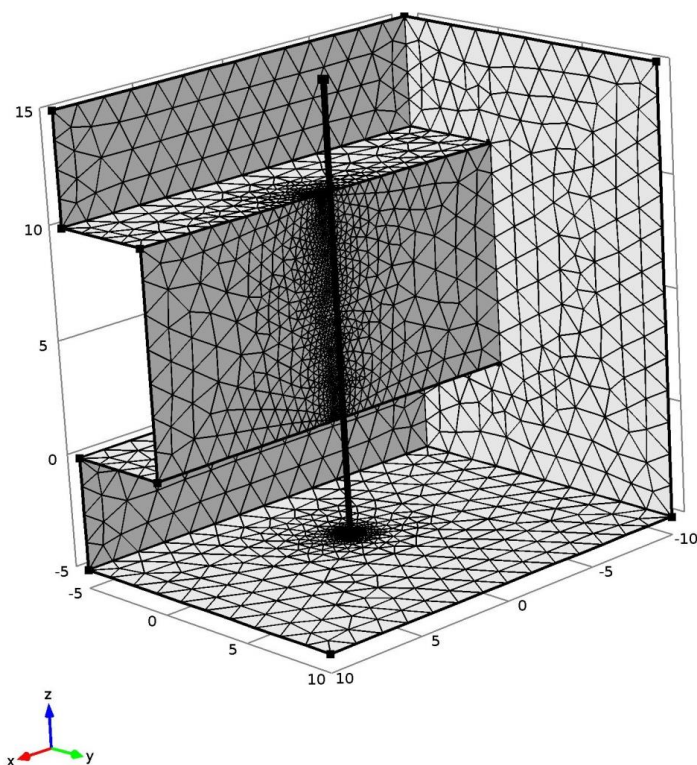


Рисунок 2.33 – Вибір системи координат (розміри в мм), побудова сітки МСЕ

Результати розрахунку розподілу густини струму на гранях анода зображено на рисунку 2.34.

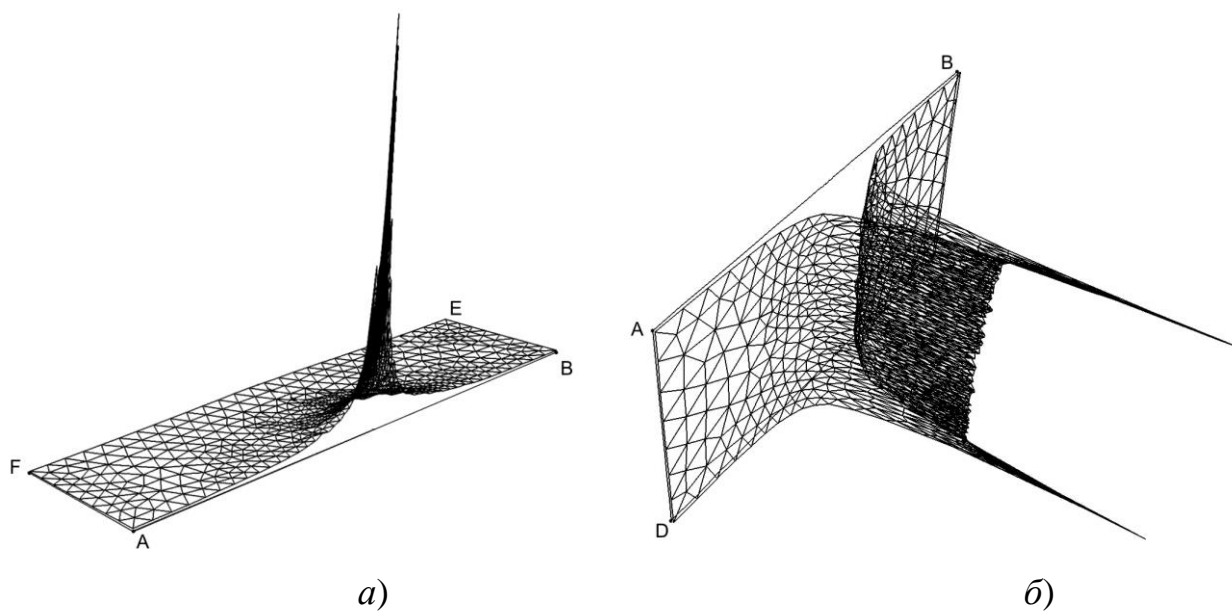
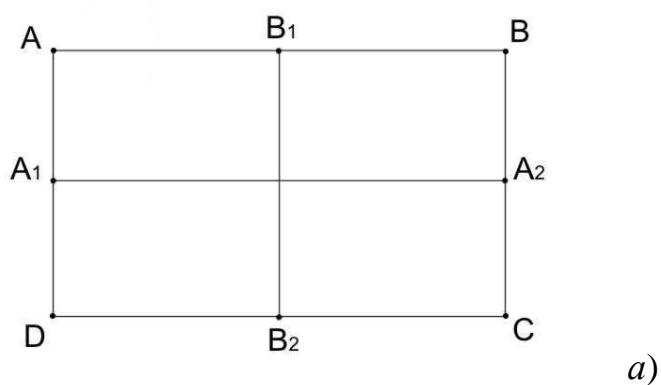
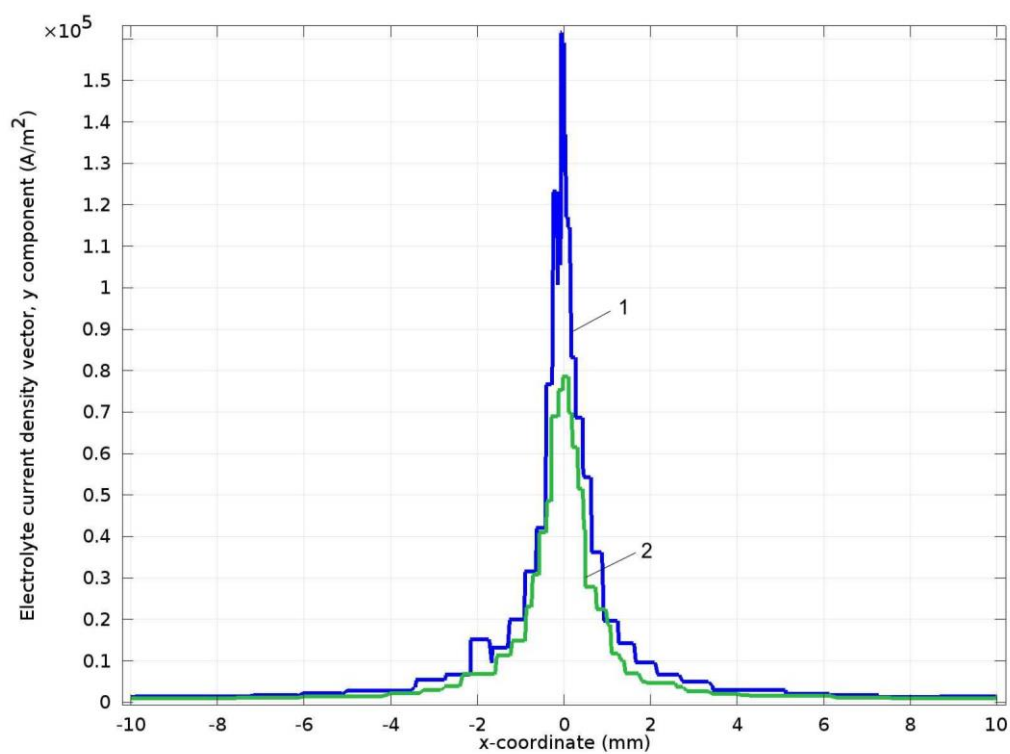


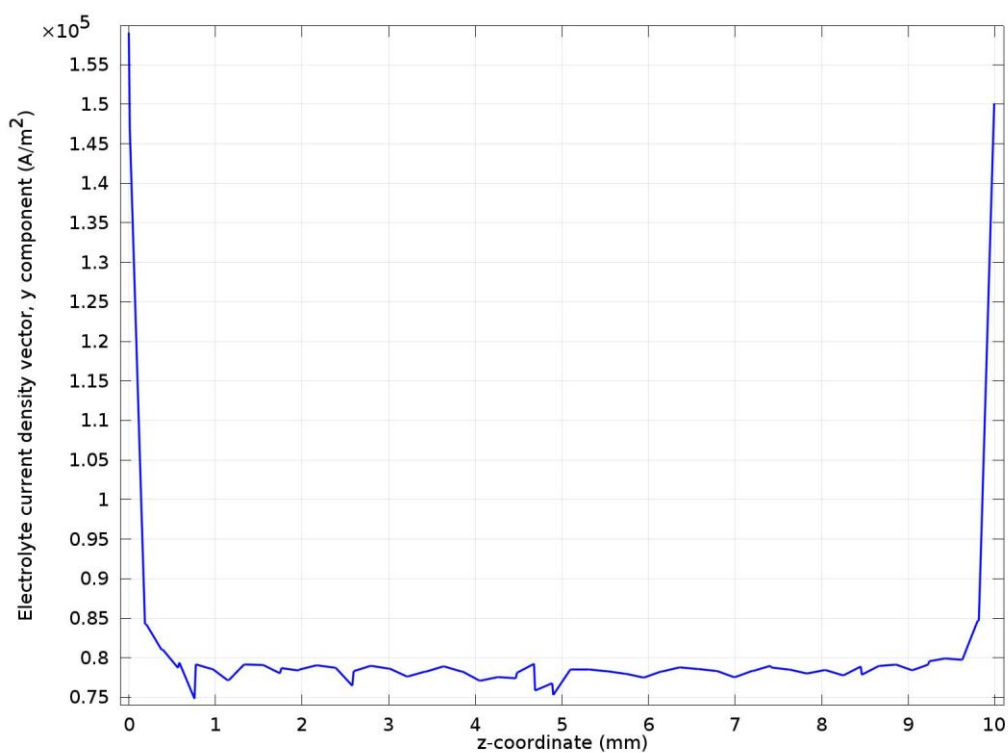
Рисунок 2.34 – Якісна ілюстрація розподілу густини струму на верхній (а) та передній (б) гранях анода

Графіки розподілу густини струму на передній грані анода вздовж характерних ліній зображено на рисунку 2.35.





б)



в)

Рисунок 2.35 – Характерні лінії на передній грані анода (а), вздовж яких побудовані графіки розподілу густини струму (б): 1 – вздовж АВ, 2 – вздовж А₁А₂; в) вздовж В₁В₂

Крива 2 (рисунок 2.35, б) збігається з результатами аналітичного розв'язку двовимірної математичної моделі пункту 2.3.2. Тобто далеко від горизонтальних границь анода застосовний точний аналітичний розв'язок задачі. Тривимірна модель дає можливість уточнити розрахунок і врахувати збурення електричного поля, викликані близькістю верхнього та нижнього ребер анода для визначення подальших процесів електрохімічного розчинення. В локальних областях на ребрах анода спостерігається двократне збільшення густини струму, що, очевидно, суттєво впливатиме на швидкість анодного розчинення в цих місцях.

2.3.4 Математична модель анодного електрохімічного розчинення на основі чисельного розв'язку крайової задачі з рухомими границями

Залежне від часу моделювання процесу розчинення матеріалу в розрахунковій системі здійснюється шляхом поєднання знайденого в кожний момент часу розподілу густини електричного струму зі зміною поверхні розчинення. Функціональним принципом ЕХО є анодне розчинення металевих зв'язків за рахунок транспортування електричного заряду Q згідно з законом Фарадея. Об'єм вилученого матеріалу V розраховується за формулою

$$V = \eta \cdot \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot Q, \quad (2.52)$$

де η – ефективність виходу за струмом, M – молярна маса матеріалу, що розчиняється, ρ – густина, z – електрохімічна валентність матеріалу, F – стала Фарадея. Швидкість видалення матеріалу в напрямку по нормалі \vec{v}_n залежить від густини струму в напрямку по нормалі \vec{J}_n :

$$\vec{v}_n = \frac{M}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot \vec{J}_n \cdot \eta(J). \quad (2.53)$$

При використанні активуючих і пасивуючих електролітів і різних за хімічним складом матеріалів анода коефіцієнт виходу за струмом може залежати від значення густини струму. Зокрема, якщо існує пасивна область, в

якій матеріал не буде розчинятися при низьких густинах струму, то цей факт може бути врахований шляхом введення функції

$$\eta(J) = \begin{cases} 1, & \text{при } J > J_{\min}, \\ 0, & \text{при } J \leq J_{\min}; \end{cases} \quad (2.54)$$

де значення J_{\min} встановлюється за додатковими експериментами з електролітами і матеріалами, що відповідають параметрам моделювання.

Приклад моделювання процесу вирівнювання поверхні зображено на рисунках 2.36, 2.37. Границя анода задавалась у вигляді прямокутних виступів висотою 20 мкм. Згідно з механізмом згладжування поверхні відповідно до теорії дії електростатичного поля концентрація густини струму на виступах більша, ніж на впадинах. В результаті виступи з плином часу розчиняються швидше. На рисунку 2.37 видно, що для повного вирівнювання поверхні знадобилося 18 с. Однак і вся границя поверхні змістилася на 55 мкм. Таке моделювання має практичне значення для вибору необхідного припуску при проектуванні технологічних процесів електрохімічної поверхневої обробки дротяним електродом.

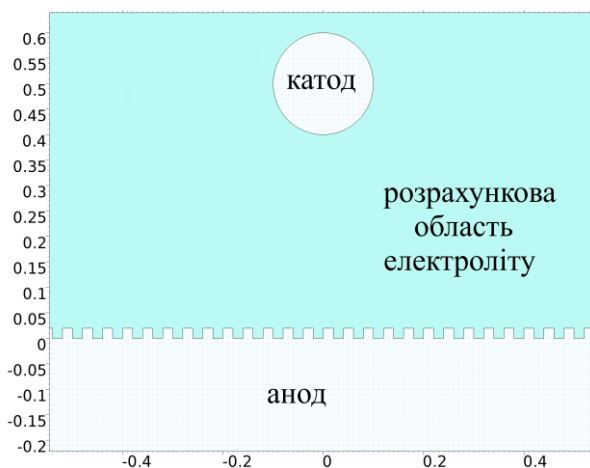


Рисунок 2.36 – Розрахункова схема з нерухомими катодом та анодом із заданою тестовою мікрогеометрією поверхні

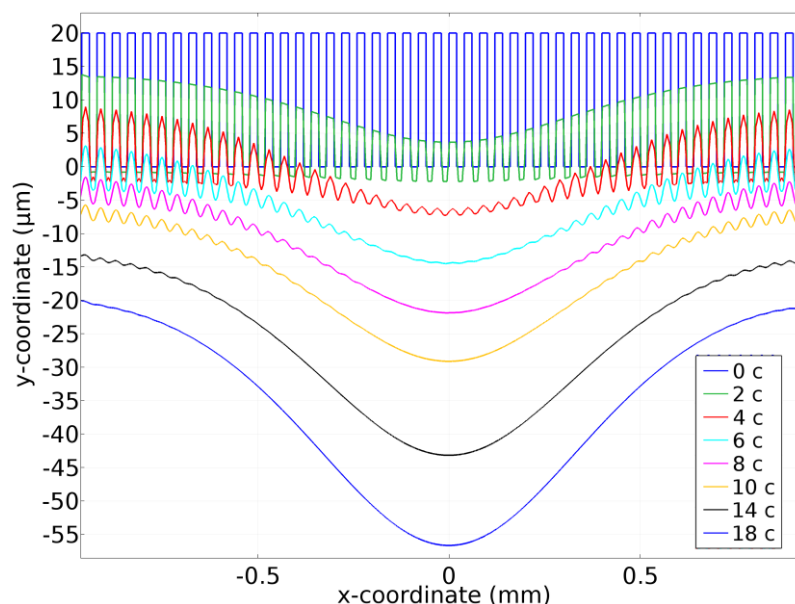


Рисунок 2.37 – Динаміка зміни границі анода

Інший приклад моделювання для конкретних технологічних параметрів з рухомим електродом дає можливість відстежити зміну конфігурації границі анода (рисунок 2.38). Видно, що з початку руху електрода на прямолінійній ділянці траєкторії товщина знятого шару не одразу набуває максимальної товщини. Таке моделювання необхідне для дотримання заданої точності виготовлення деталі при русі дротяного електрода за складною траєкторією.

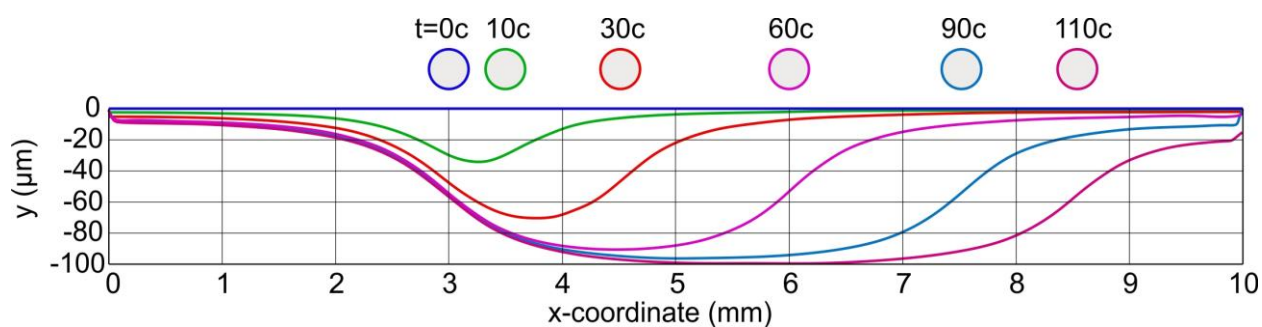


Рисунок 2.38 – Еволюція границі анода при ЕХО рухомим дротяним катодом: напруга $U = 6,87$ В; МЕР – $0,4$ мм; питома провідність електроліту $\kappa = 10,96$ См/м; діаметр дроту – $0,2$ мм; швидкість переміщення катода $\nu = 0,05$ мм/с

2.3.5 Математична модель поля швидкостей потоку електроліту в МЕР, характерних для комбінованої електроерозійної і електрохімічної обробки дрітним електродом

Як обчислювальний інструментарій для тривимірного просторового моделювання гідродинамічних параметрів потоку в цій зоні використовувалися сучасні CFD програмні пакети обчислювальної гідродинаміки [181]. Застосовано відносно просту математичну модель, яка базується на чисельному розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса для в'язкої нестисливої суцільної рідини:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \cdot \vec{v} = \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu \nabla \vec{v}) + \vec{S}, \quad (2.55)$$

де \vec{v} – векторне поле швидкостей, t – час, p – тиск, ρ – густина, μ – динамічна в'язкість, \vec{S} – масові сили; доповнених рівняннями суцільності середовища:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0. \quad (2.56)$$

Не врахований вплив температурних змін та кінетики процесів анодного розчинення на втрату енергії потоку рідини.

При переході потоку від ламінарного стану до турбулентного використано стандартну k – ε модель на основі рівнянь переносу для турбулентної кінетичної енергії та швидкості її дисипації:

$$\frac{\partial v_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(v_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \varepsilon, \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial v_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(v_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \varepsilon), \quad (2.58)$$

$$G = v_t \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right]; \quad (2.59)$$

тут v_i – компоненти вектора швидкості, v , v_t , v_{eff} – молекулярна, турбулентна кінематичні в'язкості та їх сума, відповідно; k – кінетична енергія турбулентних пульсацій; G , ε – генерація і дисипація енергії турбулентності; $C_1 = 1.44$; $C_2 = 1.92$.

Як граничні умови задавався тиск електроліту на вході в сопло (рисунок 2.39). При цьому додатково розраховується потік всередині сопла. Це займає певну частину розрахункового часу, але дає точний, адекватний реальному розподіл поля швидкостей на виході сопла – граничні умови на початку струменя. Ці умови не є повністю осесиметричними в цьому конструктивному виконанні сопла.

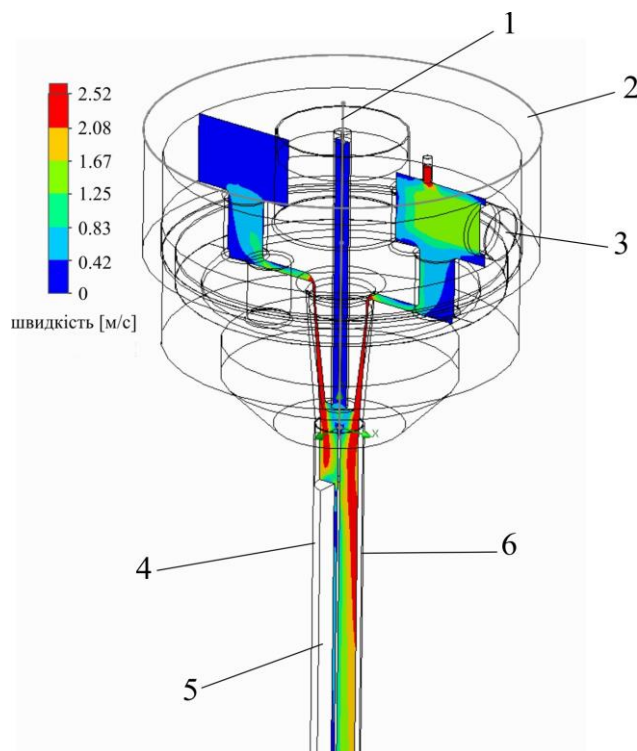


Рисунок 2.39 – Розрахункова схема: 1 – дріт-катод; 2 – сопло; 3 – вхід електроліту; 4 – деталь-анод; 5 – поверхня деталі; 6 – розрахункова область струменя

Розрахункову область вибрано у циліндричній формі навколо дріт-анодного електрода. На зовнішній стінці гранична умова – прозора стінка, тобто рідина може вільно витікати за межі області в навколишнє середовище зі звичайним атмосферним тиском:

$$p|_{\text{cp}} = p_{\text{env}}; v|_{\text{cp}} = v_{\tau}|_{\text{cp}} \text{ при } (\vec{v}, \vec{n}) > 0, \nabla(v_i, \vec{n})|_{\text{cp}} = 0 \text{ при } (\vec{v}, \vec{n}) \leq 0. \quad (2.60)$$

Розрахунок там не проводиться для економії часу. На вертикальній поверхні анода, вздовж якої проходить основний рух електроліту, задано граничні умови – стінка з шорсткістю, характерною для поверхні після першого чор-

нового проходу електроерозійного дротяного вирізання ($Ra = 2.5 - 3$ мкм). Величина шорсткості визначає положення точки переходу від ламінарного пограничного шару до турбулентного. Поверхня дротяного електрода – стінка з проковзуванням:

$$v_n|_{cp} = 0, \frac{\partial v_\tau}{\partial n}|_{cp} = 0, \quad (2.61)$$

тут v_n, v_τ – нормальна і тангенціальна складові вектора швидкості, \vec{n} – вектор нормалі до границі.

Алгоритм розрахунку граничних шарів, що застосовується в моделі, залежить від кроку сітки розбиття, яка, звичайно ж, ущільнюється в місцях концентрації технологічного струму на поверхні анода. Так, для опису граничних шарів на щільній сітці (кількість осередків сітки поперек пограничного шару – 6 чи більше) використовується підхід «товстого пограничного шару». Розрахунок параметрів ламінарного пограничного шару проводиться на основі рівнянь Нав'є-Стокса, для турбулентного пограничного шару використовується наближення модифікованим повним пристіночним профілем швидкості. Підхід «тонкого пограничного шару» для сітки з меншою кількістю осередків поперек товщини шару полягає в інтегруванні рівнянь Прандтля в напрямку нормалі до стінки по товщині динамічного пограничного шару вздовж ліній току рідини. Причому для ламінарних і турбулентних шарів використовуються дещо різні методи розв'язку цих рівнянь [181].

Розрахункова модель тестувалася в зіставленні з відомими аналітичними розв'язками рівнянь Прандтля для пограничного шару при поздовжньому обтіканні тонкої пластинки для малих та великих чисел Рейнольдса набігаючого потоку [227, 244]. Природно, розбіжності в оцінках товщини шарів з'являються при відхиленні в чисельному розрахунку від класичної схеми обтікання пластинки з наближенням дротяного електрода до поверхні анода. Це обумовлено появою сходинки, яку утворює верхня грань деталі, при входженні струменя в міжелектродний проміжок. Остання фактично переводить задачу до схеми лобового обтікання тіла з гострим кутом між передніми гра-

нями, для якої характерне явище відриву потоку з поверхні при великих числах Рейнольдса [192]. Оцінювання максимально можливої швидкості безвідривного обтікання електролітом циліндричного електрода і плоского анода проведено в публікації [242]. Інша межа застосовності розрахункової моделі визначається мінімально можливою швидкістю потоку при малому діаметрі струменя, що викликає явище прилипання струменя до поверхні, вздовж якої він розповсюджується, відоме під назвою ефекту Коанда [130, 227]. У рамках прийнятих припущень моделі не може бути також достовірно розрахований потік при критично малих значеннях міжелектродного проміжку, коли рух відбувається в тонкій щілині і суттєву роль починають відігравати параметри поверхневого натягу рідини.

Окремо слід звернути увагу на залежність меж застосовності розрахункової моделі від енергетичних параметрів ЕХРО. Важливим обмежуючим чинником є доза електричної енергії, яка подається в певний об'єм МЕП за одиницю часу. Надмірна її кількість веде до збільшення швидкості реакцій виділення водню та кисню на електродах і призводить до утворення газорідної суміші, рух якої необхідно розраховувати вже в рамках моделі двофазної течії.

Приклад типового розрахунку з використанням запропонованої моделі зображено на рисунку 2.40.

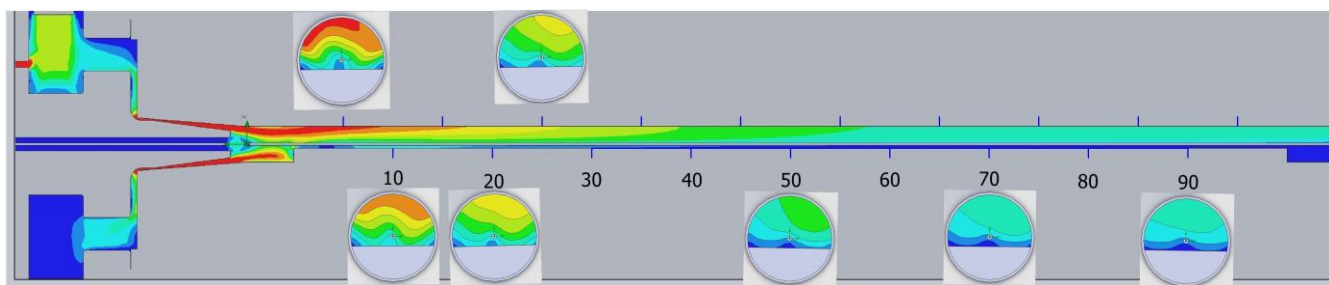


Рисунок 2.40 – Результати розрахунку поля швидкостей струменя електроліту вздовж поверхні анода

2.3.6 Математична модель вибору ефективної тривалості імпульсу струму для електрохімічного розчинення на основі аналітичного розв'язку нестационарного рівняння дифузії

Електроліз з пульсуючим струмом широко використовується в металізації, електрохімічному розчиненні, анодуванні, в процесах корозії [187]. Зокрема імпульсний струм може викликати глибокі зміни в морфології електролітичних покриттів [16, 61, 134]; це дає більш м'яке, рівномірне і компактне відкладення з кращою адгезією до підкладки. Встановлено, що пульсуючий струм модифікує процеси перенесення маси, збільшує рівень зародкоутворення, і покращує кінетику електродної реакції. Він зумовлює виникнення вібруючого шару дифузії [60, 187, 188], в якому концентрації іонних компонентів періодично коливаються поблизу електродної поверхні. При падінні рівня концентрації неминує виникає концентраційне поверхнєве перенапруження, яке залежить не тільки від величини густини пульсуючого струму, але й від частоти імпульсів. Це ініціює активацію супутніх небажаних реакцій, зокрема виділення газів на електродах, починається запирання, неефективна витрата струму. Зменшується коефіцієнт виходу за струмом електрохімічного розчинення.

В лабораторних умовах при застосуванні керуючого цифрового генератора, ввімкненого перед силовим джерелом струму, доступні будь-які форми імпульсів, обмежених тільки максимальним значенням амплітуди. В промисловості набули застосування синусоїдальні, трикутні і прямокутні форми імпульсів. У технологічних процесах електрохімічної обробки традиційно використовуються асиметричні прямокутні імпульси. У загальному вигляді форму таких імпульсів зображено на рисунку 2.41.

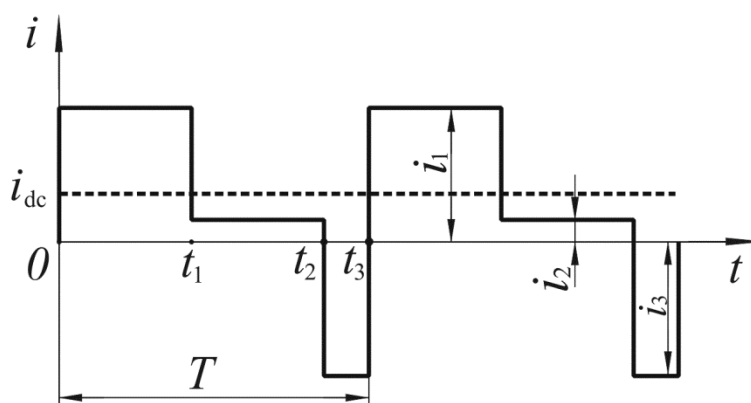


Рисунок 2.41 – Узагальнена форма технологічного струму $i(t)$: i_1 – анодний імпульс струму, i_2 – низький струм релаксаційного періоду, i_3 – короткий катодний імпульс струму

Зокрема при параметрах i_2 та i_3 , рівних нулю, імпульс струму набуває прямокутної форми.

Математична модель являє собою розв'язок нестационарної задачі дифузії в приелектродній області, який описує коливання концентрації $C(x,t)$ реагуючих іонів в електроліті внаслідок дії періодичного струму.

Математична модель будується в рамках таких спрощень: розчин електроліту має достатньо інертні іони солі, тому потоком міграції іонів внаслідок дії електричного поля можна знехтувати; фізичні параметри електроліту постійні; дія сил тяжіння в області дифузії незначна; в електроліті не відбуваються хімічні реакції. Період імпульсів має бути довшим, ніж час зарядження-розрядження подвійного електричного шару, який зазвичай триває кілька мікросекунд. За таких умов рівняння дифузії має вигляд [15]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C = D \nabla^2 C. \quad (2.62)$$

Початкові та граничні умови:

$$\begin{aligned} C &= C_{\infty} \text{ при } t = 0; \\ C &= C_{\infty} \text{ при } x \rightarrow \infty; \\ \frac{\partial C}{\partial x} &= \frac{i(t)}{nFD} \text{ при } x=0, \end{aligned} \quad (2.63)$$

де D – коефіцієнт дифузії іонного компонента, \vec{v} – швидкість електроліту, C_∞ – значення концентрації далеко від електрода (в об'ємі електроліту), n – кількість електронів, які перенесені в електродній реакції, F – число Фарадея.

Для малих періодів імпульсів струму в тонких приелектродних шарах внесок конвективної складової $\vec{v} \cdot \vec{\nabla} C$ незначний [15]. Тому рівняння (2.62) можна спростити:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C. \quad (2.64)$$

Представимо імпульсний струм, який проходить через поверхню розділу електрод/електроліт (рисунки 2.41), у вигляді суми усередненої по часу постійної складової i_{dc} і змінної складової коливального струму i_{ac} :

$$i(t) = i_{dc} + i_{ac}(t), \quad (2.65)$$

тут середня постійна густина струму:

$$i_{dc} = \frac{1}{T} [i_1 t_1 + i_2 (t_2 - t_1) + i_3 (t_3 - t_2)]. \quad (2.66)$$

Змінна густина струму на трьох ділянках:

$$i_{ac}(t) = \begin{cases} i_1 - i_{dc} & \text{при } 0 < t < t_1, \\ i_2 - i_{dc} & \text{при } t_1 < t < t_2, \\ i_3 - i_{dc} & \text{при } t_2 < t < t_3. \end{cases} \quad (2.67)$$

Аналогічно можна представити концентрацію:

$$C(x, t) = \bar{C}(x) + \tilde{C}(x, t), \quad (2.68)$$

де $\bar{C}(x)$ – стала концентрація, що встановилася, $\tilde{C}(x, t)$ – змінна концентрація.

За умови (2.68) із рівнянь (2.63), (2.64) одержимо два рівняння для $\bar{C}(x)$ та $\tilde{C}(x, t)$ з відповідними граничними та початковою умовами.

Рівняння для $\bar{C}(x)$:

$$\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} = 0, \quad (2.69)$$

за умов

$$\bar{C} = C_{\infty} \text{ при } x \geq \delta, \quad (2.70)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = -\frac{i_{dc}}{nFD} \text{ при } x = 0, \quad (2.71)$$

де δ – товщина дифузійного шару.

Розв’язком рівняння (2.69) буде:

$$\bar{C}(x) = C_1 x + C_2,$$

де C_1, C_2 – сталі інтегрування. Задовольнивши умови (2.70) і (2.71), отримаємо

$$C_1 = -\frac{i_{dc}}{nFD}, \quad C_2 = C_{\infty} + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta. \quad (2.72)$$

Тому розв’язок рівняння (2.69) набуде наступного вигляду:

$$\bar{C}(x) = -\frac{i_{dc}}{nFD} x + C_{\infty} + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta. \quad (2.73)$$

Знайдемо $\bar{C} \Big|_{x=0} = C_{\infty} + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta$. У граничному випадку при $i_{dc} = i_{\text{lim}}$ буде

$$0 = C_{\infty} + \frac{i_{\text{lim}}}{nFD} \delta, \text{ звідки}$$

$$i_{\text{lim}} = -\frac{nFDC_{\infty}}{\delta} \quad (2.74)$$

– обмежуюча величина густини постійного струму.

В літературі наведено різні формули для визначення товщини дифузійного шару. За потенціостатичного режиму: $\delta_n = \sqrt{\pi DT}$ [209]; за гальваностатичного режиму: $\delta_z = 2\sqrt{\frac{DT}{\pi}}$ [137, 192, 209]; з урахуванням швидкості v руху

електроліту по електроду $\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{vH}{v}} \cdot \left(\frac{D}{v}\right)^{\frac{1}{3}}$, де v – кінематична в’язкість еле-

ктроліту, H – відстань від початку контакту потоку, що набігає, з поверхнею анода [209].

Для коливальної частини концентрації $\tilde{C}(x, t)$ отримуємо рівняння

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} = D \nabla^2 \tilde{C} \quad (2.75)$$

з умовами:

$$\begin{aligned} \tilde{C} &= 0 \text{ при } x = \delta, \\ \tilde{C} &= 0 \text{ при } t = 0, \\ \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} &= -\frac{i_{ac}(t)}{nDF} \text{ при } x = 0. \end{aligned} \quad (2.76)$$

Задача (2.75), (2.76) розв'язується з використанням перетворення Лапласа [15, 17]. Поверхнева змінна концентрація

$$\tilde{C}_s(t) = -\frac{1}{nF} \int_0^t Y(t-u) \cdot i_{ac}(u) du, \quad (2.77)$$

$$\text{де } Y(t) = \frac{2}{\delta} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{\pi^2 D}{\delta^2} (m-\frac{1}{2})^2 t}.$$

Введемо безрозмірні величини:

$$\begin{aligned} C^* &= \frac{C}{C_{\infty}}, \quad C_s^* = \frac{C_s}{C_{\infty}}, \quad \overline{C_s^*} = \frac{\overline{C_s}}{C_{\infty}}, \quad \tilde{C}_s^* = \frac{\tilde{C}_s}{C_{\infty}}, \quad t^* = \frac{t}{T}, \quad T^* = \frac{DT}{\delta^2}, \quad \theta_1 = \frac{t_1 - 0}{T}, \quad \theta_2 = \frac{t_2 - t_1}{T}, \\ \theta_3 &= \frac{t_3 - t_2}{T}, \quad i_{PL}^* = \frac{i_{PL}}{i_{\lim}}, \quad i_1^* = \frac{i_1}{i_{\lim}}, \quad i_2^* = \frac{i_2}{i_{\lim}}, \quad i_3^* = \frac{i_3}{i_{\lim}}, \quad i_{ac}^* = \frac{i_{ac}}{i_{\lim}}, \quad i_{dc}^* = \frac{i_{dc}}{i_{\lim}}, \end{aligned} \quad (2.78)$$

де θ – сквапність, i_{PL} – гранично допустима густина струму, при якій поверхнева концентрація $C_s = 0$. Тоді згідно з (2.68) повна безрозмірна поверхнева концентрація

$$C_s^* = 1 - i_{dc}^* - \frac{1}{nFC_{\infty}} \int_0^{t^*} Y(t^* - u) \cdot i_{ac}(u) du. \quad (2.79)$$

Формула (2.79) свідчить, що C_s^* зменшується за рахунок середнього струму i_{dc} та змінного струму $i_{ac}(t)$. У формулі (2.79) згідно з (2.67) $i_{ac}(t)$ – стала для кожної ділянки (рисунок 2.41), тому розрахунки слід вести по ділянках. Отримаємо:

$$\begin{aligned}
\Psi_1 &= 2T^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \left\{ \left[1 - e^{-\lambda_m t_1^*} \right] \right\} \text{ при } 0 < t^* < t_1^*, \\
\Psi_2 &= 2T^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \left\{ \left[1 - e^{-\lambda_m t_2^*} \right] - \left[1 - e^{-\lambda_m t_1^*} \right] \right\} \text{ при } t_1^* < t^* < t_2^*, \\
\Psi_3 &= 2T^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \left\{ \left[1 - e^{-\lambda_m t_3^*} \right] - \left[1 - e^{-\lambda_m t_2^*} \right] \right\} \text{ при } t_2^* < t^* < t_3^*,
\end{aligned} \tag{2.80}$$

$$\text{тут } \lambda_m = \pi^2 T^* \left(m - \frac{1}{2} \right)^2.$$

При малих значеннях T власні числа λ_m будуть набувати малих значень, ряди у формулах (2.80) збігатимуться повільно. Щоб спростити (2.80), винесемо за знак Σ параметри, які не залежать від m , та врахуємо, що

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \frac{\pi^2}{8} \text{ [211]}. \text{ Отримаємо:}$$

$$\begin{aligned}
\Psi_1 &= 1 - \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(m - \frac{1}{2} \right)^2} e^{-\lambda_m t_1^*}, \\
\Psi_2 &= \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(m - \frac{1}{2} \right)^2} \left(e^{-\lambda_m t_1^*} - e^{-\lambda_m t_2^*} \right), \\
\Psi_3 &= \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(m - \frac{1}{2} \right)^2} \left(e^{-\lambda_m t_2^*} - e^{-\lambda_m t_3^*} \right).
\end{aligned} \tag{2.81}$$

Загальна безрозмірна поверхнева концентрація набуде вигляду

$$C_s^* = 1 - \frac{i_{dc}}{i_{lim}} - \left(\frac{i_1 - i_{dc}}{i_{lim}} \Psi_1 - \frac{i_2 - i_{dc}}{i_{lim}} \Psi_2 - \frac{i_3 - i_{dc}}{i_{lim}} \Psi_3 \right). \tag{2.82}$$

Прирівняємо до нуля C_s^* у формулі (2.82) та знайдемо допустиму густину струму $i_{PL} = i$ при $C_s^* = 0$ та при $t^* = t_1^*; t_2^*; t_3^*$, тобто в кінці кожної ділянки [15, 17].

Для простого прямокутного імпульсу (навантажена перша ділянка) отримаємо

$$i_{PL} = \frac{i_{\lim}}{\theta_1 + (1 - \theta_1)\Psi_1}. \quad (2.83)$$

Для ефективної обробки з максимальним значенням коефіцієнта виходу за струмом потрібно виконання умови

$$i_{\max} \approx i_{PL}, \quad (2.84)$$

де i_{\max} для випадку циліндричного дротяного катода і плоского анода обраховується за формулами розділу 2.3.2. Вимогу (2.84) можна задовольнити, змінюючи технологічні параметри U , r , s , C_∞ , а також за рахунок вибору t_1 , T , розв'язавши рівняння (2.83) відносно θ_1 .

Для повної форми імпульсу (рисунок 2.28) отримаємо

$$i_{PL} = \frac{1}{\frac{t_1}{T} + \Psi_1 - \frac{t_1}{T}\Psi_1 - \frac{t_1}{T}\Psi_2 - \frac{t_1}{T}\Psi_3} \left[i_{\lim} - i_2 \frac{t_2 - t_1}{T} - i_3 \frac{t_3 - t_2}{T} + i_2 \frac{t_2 - t_1}{T} \Psi_1 + i_3 \frac{t_3 - t_2}{T} \Psi_1 - \right. \\ \left. - i_2 \Psi_2 + i_2 \frac{t_2 - t_1}{T} \Psi_2 + i_3 \frac{t_3 - t_2}{T} \Psi_2 - i_3 \Psi_3 + i_2 \frac{t_2 - t_1}{T} \Psi_3 + i_3 \frac{t_3 - t_2}{T} \Psi_3 \right]. \quad (2.85)$$

Отримані аналітичні формули можуть бути внесені у відомий програмний математичний пакет MathCAD, і розрахунки є доступними для використання в інженерній практиці при проектуванні технологічних процесів електрохімічної обробки з використанням імпульсного струму.

Висновки за розділом 2

1. Запропоновано та реалізовано загальну апаратну схему експериментального комплексу для дослідження базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом за умов, близьких до практичної реалізації конкретних завдань новітньої комбінованої технології послідовного застосування електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

2. На основі розрахункових та експериментальних досліджень запропоновано і реалізовано конструкцію сопла, яке забезпечує необхідні гідродина-

мічні характеристики подачі струменя робочої рідини в зону обробки при послідовних технологіях ЕЕВОДЕ та ЕХРОДЕ. Запатентовано (патент на винахід UA 117497 C2) конструкційне рішення з додатковим каналом розрахованого поперечного перерізу, що повністю усуває інжекцію повітря і стабілізує вихідний струмінь.

3. Розроблено та реалізовано конструкції модельних осередків для експериментальних досліджень впливу гідродинаміки потоку на процеси анодного розчинення зразків.

4. Розроблено оригінальні розрахунково-експериментальні методики досліджень:

- визначення реальної форми дротяного електрода внаслідок дії електричних розрядів та гідродинамічних сил;
- моніторингу стану міжелектродного проміжку через математичну обробку осцилограм напруга – струм.

5. Вперше створено комплекс математичних моделей з використанням CFD та CAE методів для досліджень та розрахунків параметрів базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом, а саме:

- математична тривимірна модель теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв’язку трифазної задачі теплопровідності;
- математична модель розподілу електростатичних полів між циліндричним катодом і плоским анодом на основі теорії функцій комплексного змінного;
- математична тривимірна модель розподілу електростатичних полів для технологічної схеми дротяний катод – складноконтурний анод;
- математична модель анодного електрохімічного розчинення на основі чисельного розв’язку крайової задачі з рухомими границями;
- математична модель вибору ефективної тривалості імпульсу струму для електрохімічного розчинення на основі аналітичного розв’язку нестационарного рівняння дифузії;

– математична модель поля швидкостей потоку електроліту в МЕР, характерних для комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

РОЗДІЛ 3

ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ РУЙНАЦІЇ ТА ФОРМУВАННЯ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ЕЛЕКТРОДІВ РОЗРЯДАМИ МАЛОЇ ТРИВАЛОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ

3.1 Аналіз процесів руйнування металів розрядами з енергією та тривалістю, характерними для електроерозійного дротяного вирізання

Електроерозійна обробка полягає у зміні форми, розмірів, шорсткості та властивостей поверхні заготовки під дією електричних розрядів в результаті електричної ерозії. Під електричною ерозією розуміють руйнування поверхні електродів, що супроводжується зніманням металу при проходженні між електродами електричних розрядів в середовищі рідкого діелектрика. Явища в міжелектродному проміжку, що відбуваються в процесі електроерозійної обробки, досить складні і описуються переважно тільки якісно. Проте з аналізу процесів руйнування металів іскровими розрядами можна зробити ряд важливих висновків для вибору адекватних методів математичного опису цих явищ, встановлення меж застосовності математичних моделей, що сприятиме більш точному прогнозуванню стану поверхні після електроерозійної обробки.

Розглядають три фази процедури одиничного розряду в складі послідовної періодичної дії множини розрядів [157]: фаза підготовки до пробою, фаза розряду і фаза інтервалу між розрядами.

Імпульс напруги, що подається від генератора на електроди, створює електричне поле в МЕП, яке досягає найбільшої напруженості в місці, де поверхні електродів знаходяться найближче і де частки продуктів руйнації електродів від попередніх розрядів змінюють діелектричні параметри проміжку, створюючи містки провідності. Запалювання не буде відбуватися в місцях попередніх розрядних каналів через залишковий газовий міхур, що існує набагато довший час, ніж пауза між імпульсами [157]. Запуск розряду відбува-

ється в разі досягнення амплітудного значення напруги пробою і появи необхідного мінімального струму (близько 3 А) для забезпечення початкової потужності для випаровування (емісії) частинок.

Найбільш складною є фаза проходження розряду, яку поділяють на кілька стадій. Перша триває 10^{-7} - 10^{-8} с і полягає в іонізації діелектрика, що знаходиться між електродами, та створенні каналу наскрізної провідності [226]. Від катода відділяється стример, який через зважені в рідині частинки спрямовується до анода, випаровуючи та іонізуючи на своєму шляху рідину. Електронний пучок, що йде за стримером, стискається в радіальному напрямку під дією іонів, яка зменшує його поперечний переріз і спрямовує рух. В результаті пучок електронів, що налітає, стає «відшнурованим» від навколишнього простору. В момент підходу стримера до анода задіяний обсяг рідини виявляється розірваним. В утвореному просторі знаходяться пар, газ, плазма і електронний пучок. Градієнт температури вельми великий, близько 10 000 °С. На плазму і електронний пучок у цей момент діють стискаючі зусилля, направлені до осі розряду. На рідину, пар і газ діють сили в напрямку від осі розряду, що мають вибуховий характер, і в площині, перпендикулярній осі розряду, виникає і починає поширюватися ударна хвиля [226]. Це призводить до розширення каналу (газопарової суміші) із надзвуковою швидкістю 3000-5000 м/с [233].

Отже, вже на першій стадії, яка становить менше 10 % тривалості розрядів, характерних для електроерозійного дротяного вирізання, на поверхні анода формується вузьке джерело тепла, навколо якого знаходиться газопарова суміш з розмірами, що значно перевищують розміри майбутнього кратера лунки. Тобто поверхня анода у крайовій задачі теплопровідності може бути представлена у вигляді ділянки із заданим тепловим потоком, поза межами якої коректними будуть адіабатичні граничні умови.

В наступній стадії розряду по сформованому каналу провідності електрична система різко звільняє накопичену енергію, відбувається виділення величезної енергії в дуже малих діючих об'ємах. Імпульс струму проходить у

МЕП і викликає появу сильного магнітного поля. В результаті дії електродинамічних сил іони починають з великими швидкостями переміщатися до осі розряду. Наслідком цього спрямованого руху є стиснення електронного пучка (так званий пінч-ефект) і дуже різке зростання температури струмопровідного каналу [226].

Високі температури викликають випаровування матеріалу на обох електродах. Оскільки електронні процеси (менша маса, ніж у аніонів) показують більш швидку реакцію, переважно зношується матеріал анода. Цей ефект викликає мінімальний знос електрода-інструменту за умови короткої тривалості імпульсів, характерної для дротяного електроерозійного вирізання. Густина струму і температура згодом швидко зменшуються з безперервним зростанням плазмового каналу. Діаметр плазмового каналу стабілізується при досягненні рівноваги між подачею енергії від генератора і тепловим потоком на електроди, а також подальшим випаровуванням рідини в діелектрик. У цей час випаровування рідини продовжує збільшувати об'єм газового міхура навколо плазмового каналу. Цей розширений випускний канал все ще знаходиться під високим тиском, адже рідина під час випаровування примножує свій обсяг у 20-40 разів залежно від рівня тиску. Під час плазмових коливань метал може бути частково викинутий із плями розплаву в моменти зниження тиску [157].

Передача енергії електродам відбувається за рахунок таких механізмів [218, 233]:

- бомбардування зарядженими частинками (електрони – анод, іони – катод);
- термічне бомбардування нейтральними частинками, що наявні в каналі розряду;
- гальмування факелів парів, що надходять на анод та катод з протилежного електрода;
- теплове випромінювання;
- дія об'ємного джерела тепла.

За умов ЕЕДВ ерозійне руйнування електродів в основному ($\sim 97\%$) визначається електронним (на деталі) та іонним (на ДЕІ) компонентами. Дією інших компонентів внаслідок малості їх енергій (до 3% ерозійного руйнування) можна знехтувати. Тобто можемо вважати, що на поверхню електрода діє об'ємне нестационарне джерело тепла. Амплітуда і тривалість імпульсу розрядного струму визначають густину теплового потоку, яка залежить також від швидкості розширення каналу імпульсного розряду. При тривалості імпульсів, рівній часткам і одиницям мікросекунд, що характерно для ЕЕДВ, густини потужності (теплового потоку) становлять до 10^6 - 10^8 Вт/см², а площі розрядного каналу малі, внаслідок чого для таких імпульсів характерна більша частка перегрітого і випарованого матеріалу в загальній кількості видаленого з лунки [220].

Для значень густини теплового потоку до 10^9 Вт/см² відбувається теплова руйнація, матеріал видаляється з лунки випаровуванням і в розплавленому стані. Продукти іскрової електричної ерозії завжди мають кулясту форму і являють собою застигли краплі, що експериментально доводиться будь-яким методом. Винятком із цього загального правила є металокерамічні і велими крихкі матеріали, які під дією імпульсу струму просто руйнуються [226].

Очевидно, вищенаведене пояснює той факт, що переважна більшість дослідників використовують саме термофізичне моделювання для опису процесів електроерозійного руйнування матеріалів.

На завершальній фазі розряду припиняється проходження струму в МЕР і починається деіонізація газового проміжку. Однак газовий міхур залишається на місці досить довго. При деіонізації також відбувається зниження тиску і температури в плазмовому каналі. Розплавлений матеріал в утворених лунках на електродах, перегрітий під тиском розряду, тепер починає миттєве кипіння і викидається. Реактивним струменем парів металу рідкий метал, що залишився в лунці, видавлюється з неї і, застигаючи, утворює облямовувальний валик. Викид цієї додаткової порції металу відбувається через

3-5 тривалостей імпульсу після закінчення імпульсу струму, і потім охолоджена поверхня лунки набуває остаточної форми [243].

Викид матеріалу відбувається у вигляді рідких глобул. Коли вони потрапляють на досить холодний діелектрик, вони піддаються ударному загартовуванню ззовні і згодом мають внутрішні поглиблення, спричинені подальшою усадкою металу. Концентрація шламу навколо більш ранніх розрядів створює рівень провідності в МЕП, що визначає мінімальний час відключення струму, якого необхідно дотримуватися, перш ніж можна буде починати нове запалювання. Цей момент зазвичай досягається після 5-15 мкс, коли рівень деіонізації колишнього плазмового каналу опускається нижче середнього значення щільності провідності [157].

Наступні розряди розподіляються по оброблюваній поверхні гніздами, оскільки виникнення наступного розряду найбільш імовірно поблизу ділянки, враженої попереднім розрядом. Чим менша пауза між імпульсами, тим, за інших рівних умов, більше розрядів у гнізді. Розподіл розрядів по поверхні суттєвим чином впливає на шорсткість отриманої поверхні, товщину зміненого шару [220].

Всі розглянуті процеси справедливі тільки для іскрових імпульсів електричного струму. Як тільки тривалість імпульсів перевищить межу 10^{-3} с, з'являються дугові електричні імпульси, і картина процесів різко змінюється. Найважчим наслідком є порушення самофокусування розряду – він «розповзається» по поверхні анода. Звідси ясно, що для проведення, наприклад, розмірної обробки металів найбільш придатною є іскрова форма дугового розряду [226].

Для математичного моделювання процесів руйнації матеріалу анода іскровими розрядами і формування поверхні необхідно встановити два основні параметри джерела тепла та їх зміну в часі: це розподіл амплітуди потужності по області дії джерела і розміри області дії джерела. Згідно з позначеннями, наведеними на рисунку 3.1 [34], визначальними параметрами іскрового розряду для теплової руйнації анода є $q_A(r,t)$ та $r_A(t)$.

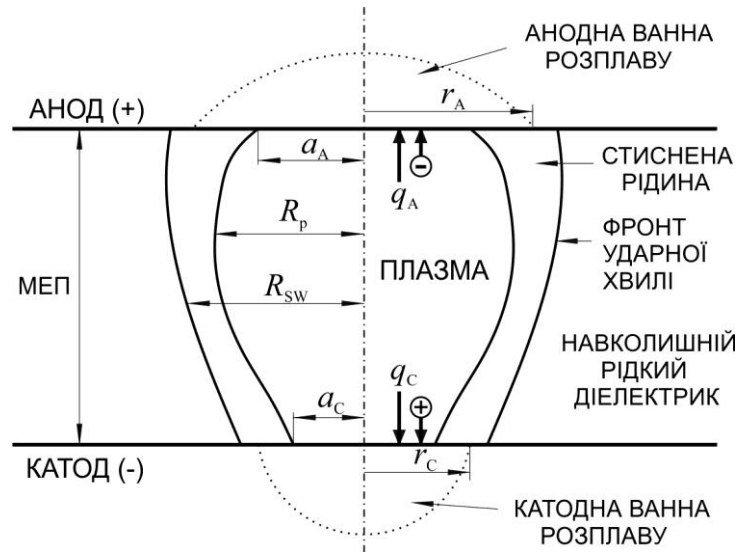


Рисунок 3.1 – Принципова схема процесу електроіскрового розряду, що ілюструє джерело тепла, конфігурацію плазми та порожнини плавлення на момент початку розширення каналу [34]:

r_A – радіус анодної ванни розплаву, r_C – радіус катодної ванни розплаву, q_A – тепловий потік на анод, q_C – тепловий потік на катод, a_A – радіус плазми на поверхні анода, a_C – радіус плазми на поверхні катода, R_p – радіус плазми в МЕП, R_{sw} – радіус фронту ударної хвилі

Під час роботи напруга U , прикладена між анодом і катодом, досягаючи величини пробою на типовому міжелектродному зазорі 40 мкм, руйнує діелектричну рідину. Далі напруга зменшується, а струм I піднімається до постійної величини, встановленої оператором. Плазмовий канал, оточений бульбашкою пару, зростає. Навколишній щільний рідкий діелектрик обмежує ріст плазми, концентруючи введену енергію UIt у дуже малому обсязі.

Загальна енергія, надана системі катод – МЕП – анод, визначається досить точно за знятими сигналами $u(t)$ – напруги та $i(t)$ – струму протягом проходження одиничного іскрового розряду

$$E = \int_0^{t_i} u(t) \cdot i(t) dt, \quad (3.1)$$

де t_i – час дії робочого імпульсу.

Подальший розподіл наданої енергії між анодом, катодом і діелектричною рідиною визначається експериментально-розрахунковим шляхом. Вимірюють об'єми видаленого матеріалу з обох електродів, температуру електродів та рідини і на основі розрахунків кількості затраченої енергії проводять оцінювання розподілу енергії [54, 81, 194]. Такі методи не можна вважати точними, адже неможливо встановити достеменно, яка саме частка матеріалу була видалена випаровуванням, а яка видалена у розплавленому стані. Витрати енергії на видалення матеріалу у першому і другому випадках суттєво відрізняються.

Отримані результати дослідів для конкретних технологічних схем іскрового розряду не можна вважати універсальними. Проте певні закономірності розподілу енергії при проходженні розряду встановлено багатьма дослідниками.

Об'єми анодного і катодного видалення значною мірою залежать від тривалості розряду, і вони досить різні, навіть коли матеріали двох електродів однакові. Хіа Н. та ін. [194] в експериментах з мідними електродами встановили, що величина видаленого об'єму матеріалу з анода є більшою, ніж з катода для тривалості розряду до 20 мкс, тоді як вона менша за тривалості розряду понад 20 мкс. Motoki M. і Hashiguchi K. [115] та Van Dijck F. [184] припускали, що таке явище обумовлене зміною енергій, розподілених на анод і катод з тривалістю розряду на основі Т-Ф теорії електронних емісій. Це твердження також логічно впливає з аналізу процесів проходження іскрового розряду, проведеного в роботах Б. Р. Лазаренка, цитованих вище, згідно з якими руйнацію анода зумовлює більш рухома електронна компонента, а руйнацію катода – повільна іонна компонента.

DiBitonto D. D. та ін. [34] наводять якісну ілюстрацію швидкості ерозії для анода та катода залежно від часу тривалості імпульсу (рисунок 3.2). Максимальна анодна ерозія виникає приблизно за 3 мкс, тоді як максимальна катодна ерозія відбувається за 30 мкс. Це визначено з експериментальних SIT

(System integration testing) даних при 10 А для мідного анода і сталевого катода та порівняльного аналізу з SIT даними AGIE Corporation.

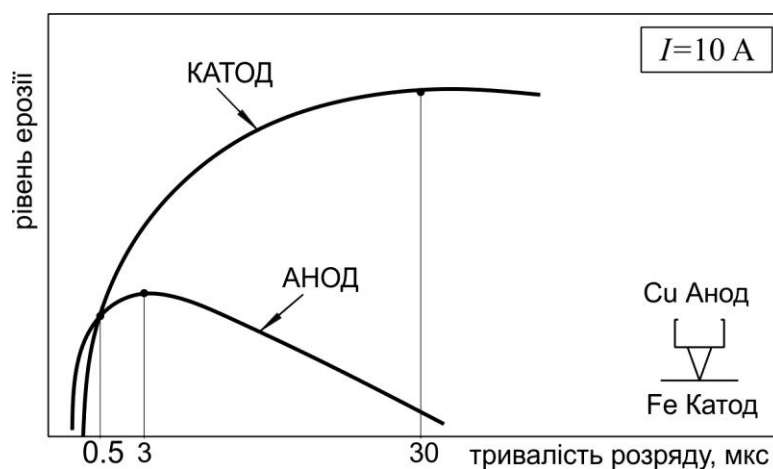


Рисунок 3.2 – Різниця між швидкістю ерозії анода та катода з різним часом тривалості імпульсу (не в масштабі) [34]

З наведених результатів випливає, що для коротких імпульсів (близько 1 мкс) і порівняно високих значень струму (близько 800 А), які використовуються в ЕЕДВ, характерний суттєвий різкий перерозподіл енергії протягом часу проходження розряду. Результати відсоткового розподілу енергії, отримані дослідниками для довготривалих імпульсів (десятків і сотень мікросекунд) і невеликої амплітуди струму, характерних для прошивної ЕЕО, не можуть бути перенесені на короткотривалі розряди. Необхідне проведення експериментально-розрахункових досліджень для конкретних технологічних схем ЕЕДВ (див. підрозділ 3.2) і створення поповнюваної бази технологічних даних (розділ 6).

Температура плазмової дуги ЕЕО настільки висока, що здатна не тільки випаровувати електродні матеріали і діелектричну рідину, але й дисоціювати та іонізувати їх молекули і атоми. Науакawa S. та ін. [54] дійшли висновку, що ЕЕО не перебуває в рівновазі протягом тривалості розряду, а більша частка потужності розряду використовується в хімічних реакціях. Eubank P. T. та ін. [36] проаналізували збільшення ентальпії плазми, що включає дисоціацію та іонізацію води. Lauwers B. та ін. [93] досліджували швидкість різання

ЕЕВО кераміки, використовуючи деіонізовану воду, і зазначили, що, крім типових механізмів видалення матеріалу, таких як плавлення і випаровування, були виявлені інші механізми, такі як розкладання і окиснення.

При ЕЕО в металі в зоні дії імпульсного електричного розряду, коли виникнення струму передуює переходу речовини в плазму, проходять складні фізико-хімічні процеси. Розплавлення металу, хімічна взаємодія елементів і їх дифузія, фазові перетворення відбуваються в мікрооб'ємах як в умовах нагріву за досить обмежений час до температур, що значно перевищують температуру кипіння електродних матеріалів, так і при надвисоких швидкостях тепловідведення.

В результаті в зоні дії розряду формуються вкрай нерівноважні структури з високою гетерогенністю за складом, структурою та властивостями, які надають залізовуглецевим сплавам такі унікальні властивості, як надвисока твердість, підвищена міцність, термічна і хімічна стійкість, малий коефіцієнт тертя. Однак питання ефективного використання подібних вторинних структур у металознавстві не розглядаються, і структурно-кінетичний підхід до досліджень процесів вторинних фазових і структурних перетворень, що викликають суттєве збільшення експлуатаційних характеристик поверхневих шарів сталі, не розроблений.

3.2 Математичне моделювання теплофізичної дії одиничного розряду на поверхню анода

3.2.1 Обґрунтування прийнятих припущень та межі застосування математичного моделювання за умов ЕЕДВ

За ЕЕДВ руйнування матеріалу відбувається внаслідок багатократної дії іскрових розрядів. Кожний акт іскрового розряду видаляє певну кількість матеріалу анода з утворенням ерозійної лунки. Вся поверхня анода формується завдяки перекриттю множини лунок. Тому для вирішення задач підвищення продуктивності ЕЕДВ, керованого впливу на стан обробленої поверх-

ні важливим є встановлення чітких параметрів проходження іскрового розряду і формування одиничної лунки для конкретних технологічних режимів генераторів коротких імпульсів, що входять до складу обладнання ЕЕДВ (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Параметри генераторів коротких імпульсів, що використовуються для ЕЕВО

№ з/п	Виробник, модель	Код режиму	E_i , мДж	I_A , А	τ_i , мкс
1	НВО «Ротор», ГКІ 300-200А	2–2	2,45	85	7,1
2	НВО «Ротор», ГКІ 300-200А	2–3	3,3	111	9
3	НВО «Ротор», ГКІ 300-200А	3–4	0,78	30	2,1
4	«Араміс», МГКІ-1	4	4,78	125	1,85
5	AccuteX GE-43SA	2	1,24	100	0,1
6	AccuteX GE-43SA	4	5,4	250	0,2
7	AccuteX GE-43SA	7	26	700	0,5
8	Agie Charmilles CUT 20P	6	26,3	800	1,2

Для більшості металів при густині потужності поверхневого джерела тепла $q_0 = 10^7$ - 10^9 Вт/см² основні витрати енергії пов'язані з випаровуванням металу; внутрішня енергія продуктів руйнування і теплота плавлення у цьому випадку відносно малі. Область значень q_0 , при яких витрати енергії на випаровування вже не встигають поглинати всієї підведеної до металу енергії і все більша її частина витрачається на збільшення внутрішньої енергії продуктів руйнування, що розлітаються, перевищує $q_0 = 10^{10}$ Вт/см² і є практично недосяжною для умов ЕЕДВ [223, 233]. Отже, математична модель руйнації матеріалу анода від дії іскрового розряду для умов ЕЕДВ може бути побудована на основі розв'язку крайової задачі теплопровідності з урахуванням фазових змін матеріалу за його плавлення та випаровування.

Без суттєвої втрати адекватності математичної моделі реальним фізичним процесам ерозійної руйнації, що відбуваються в зоні дії іскрового розряду, прийняті наступні спрощуючі припущення:

- 1) модель розроблена для одиничного розряду, тобто зміна теплофізичних параметрів середовища в зоні обробки від дії попереднього і наступного іскрових розрядів не враховується;
- 2) діапазон зміни температури в локальній зоні дії розряду досить великий, тому теплофізичні властивості матеріалу заготовки розглядаються як функція температури;
- 3) щоб уникнути різких змін теплоємності внаслідок плавлення та випаровування, ентальпія металу розглядається як функція температури;
- 4) вплив радіаційного та конвекційного теплообміну на теплові процеси не враховується;
- 5) вважається, що джерело тепла має гаусовий розподіл густини теплового потоку на поверхні заготовки;
- 6) розглянута робоча область є осесиметричною відносно площини $r - z$;
- 7) склад матеріалу заготовки вважається однорідним та ізотропним;
- 8) заготовка не має будь-якого типу напружень перед електроерозійною обробкою.

За порівняльного аналізу рівня застосованої в дисертаційній роботі математичної моделі з аналогічними моделями електроерозійної руйнації матеріалу, використаними та опублікованими іншими дослідниками, можливо стверджувати наступне. Процес видалення матеріалу під час однієї іскри включає дві фази: плавлення матеріалу та викидання розплавленого матеріалу. Оскільки механізм викидання розплавленого матеріалу після зменшення іскри не до кінця вивчений, більшість моделей [49, 127, 166, 172, 202] для визначення форми кратерів спираються на ізотермічний процес плавлення. Модель, використана в дисертаційній роботі, враховує також і процес випаровування, на який витрачається суттєва частина енергії.

На час проведення пошуку літератури було опубліковано два незалежні імітаційні дослідження щодо формування кратерів, які розглядали як нагрівання, так і викидання матеріалів. Yang X. [199] провів моделювання молекулярної динаміки процесу формування кратерів з відносно невеликою енергією розряду з урахуванням розширення і колапсу бульбашок. Аналіз механізму видалення матеріалів дав можливість зробити висновок, що випаровування та вибух бульбашок перегрітих металів були основною причиною видалення матеріалу. Також було встановлено, що лише 2 ~ 5 % розплавленого матеріалу викидається. Тао J. [101, 176] включив стиснення газових бульбашок і викидання розплавленого матеріалу в чисельне моделювання утворення кратера з одноразовим розрядом. Завдяки обмеженню імітаційного інструменту FLUENT Тао J. лише імітував стиснення та руйнування газового міхура. Утворення і розширення міхура не враховувалися. Однак, оскільки викид матеріалу здебільшого відбувається під час руйнування бульбашок, моделювання дало хороший прогноз щодо діаметра кратера. Моделювання Тао J. породжувало реалістичну морфологію кратера з увігнутим центром, оточеним облямовувальним буртиком.

Отже, для параметрів електричних імпульсів, які використовуються для ЕЕВО, характерне невелике значення частки викинутого з лунки матеріалу у вигляді розплаву відносно загального об'єму утвореного кратера одиничним розрядом. Водночас існують сучасні розробки генераторів струму для ЕЕВО [126, 233], що складаються з двох джерел живлення – низьковольтного малопотужного та високовольтного потужного – і реалізують «гребінчасту» форму імпульсів, які забезпечують утворення збільшеного об'єму розплавленого матеріалу і, завдяки різкому зниженню рівня струму в кінці дії імпульсу, схлопування каналу розряду, різку зміну тиску і в результаті посиленій викид розплаву з лунки. Очевидно, що за таких умов електроерозійної руйнації матеріалу необхідне застосування математичних моделей з урахуванням гідродинамічних процесів викиду матеріалу у розплавленому стані.

3.2.2 Встановлення просторово-енергетичних характеристик джерела тепла

Для моделювання теплових процесів в ЕЕО більшість дослідників апроксимують джерело тепла за допомогою гаусового розподілу [8, 34, 36, 196]. Рівняння теплового потоку від дії іскрового розряду за ЕЕО отримують, враховуючи математичний опис розподілу Гауса [71].

Функція густини ймовірності розподілу Гауса для випадкової величини r зображена на рисунку 3.3 і задається співвідношенням

$$p(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.2)$$

де $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ – пікова величина розподілу, а σ – стандартне відхилення.

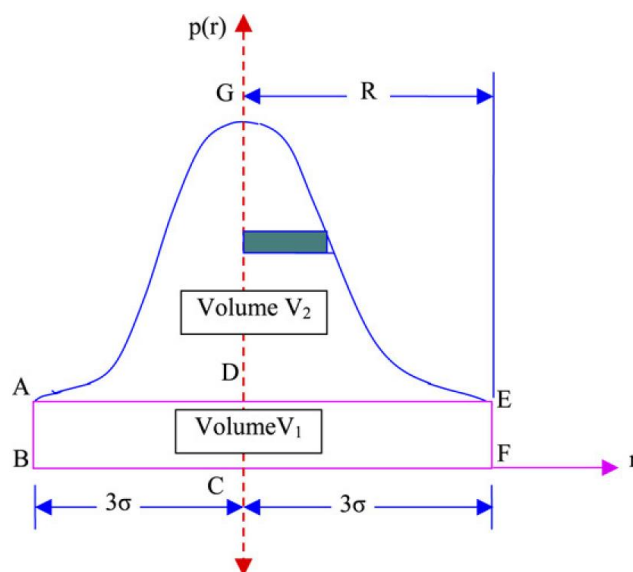


Рисунок 3.3 – Схема розподілу густини теплового потоку від дії іскрового розряду, що описується за допомогою функції Гауса [71]

Оскільки функція Гауса не набуває нульового значення до нескінченності, виникає необхідність вибрати якесь скінченне велике значення R її аргументу для представлення теплового потоку. Зазвичай приймають $R = 3\sigma$, так що 99,75 % значень лежить у проміжку

$-3\sigma \leq R \leq +3\sigma$ (рисунок 3.3). Опис тривимірного теплового потоку можна отримати, обертаючи гаусову криву навколо вертикальної осі.

Підставляючи значення σ у формулу (3.2), отримаємо

$$p(r) = \frac{3}{\sqrt{2\pi}R} e^{-4.5 \frac{r^2}{R^2}}. \quad (3.3)$$

Для ЕЕО функція $p(r)$ описує інтенсивність тепла, що надходить від іскрового розряду, яка позначається q і є функцією r та змінюється з часом t . При $r = 0$ $q(r, t) = q_0(t)$, де $q_0(t)$ – максимальна інтенсивність тепла, що діє в центрі джерела. Отже, тепловий потік системи (рівняння (3.3)) виражається через

$$q(r, t) = q_0(t) \cdot e^{-4.5 \frac{r^2}{R^2}}. \quad (3.4)$$

Таким чином, потужність, що надходить від об'ємного джерела тепла, запишеться наступним виразом:

$$\oint q(r, t) dA = \int_0^R q_0(t) \cdot e^{-4.5 \frac{r^2}{R^2}} 2\pi r dr = \frac{\pi R^2 q_0(t)}{4.5} (1 - e^{-4.5}) = 0.219\pi q_0(t) R^2. \quad (3.5)$$

Величина потужності, що припадає на заготовку, є часткою поданої потужності електричного імпульсу і може бути представлена таким чином:

$$k \cdot U(t) \cdot I(t), \quad (3.6)$$

де k – частка тепла, що надходить до заготовки, $U(t)$ – напруга, $I(t)$ – струм розряду. Тому можемо записати

$$k \cdot U(t) \cdot I(t) = 0.219\pi q_0(t) R^2$$

або

$$q_0(t) = \frac{4.57 \cdot k \cdot U(t) \cdot I(t)}{\pi R^2}. \quad (3.7)$$

Після підстановки (3.7) в (3.4) отримаємо

$$q(r, t) = \frac{4.57 \cdot k \cdot U(t) \cdot I(t)}{\pi R^2} e^{-4.5 \frac{r^2}{R^2}}. \quad (3.8)$$

Деякі дослідники в більш ранніх роботах використовували джерело тепла з постійно-смуговим розподілом потоку, тобто для осесиметричної пос-

тановки задачі у вигляді диска радіусом R [6, 184, 128]. Формула (3.8) фактично отримана шляхом прирівнювання об'ємів (енергій) фігур, утворених обертанням навколо вертикальної осі симетрії прямокутника ABFE і гаусоїди AGE (див. рисунок 3.3). Таке суто математичне виведення формули розподілу густини теплового потоку не дає зв'язку з фізичними процесами в зоні дії іскрового розряду, описаними в підрозділі 3.1.

У дисертаційній роботі запропоновано, розроблено і використано поєднання експериментального дослідження і математичного моделювання процесу утворення ерозійної лунки. Завдяки цьому методу вдалося встановити кількісний взаємозв'язок параметрів у формулі (3.8) з характеристиками утворюваної лунки. І навпаки, використовуючи розв'язок оберненої задачі теплопровідності та експериментально отримані параметри ерозійної лунки, визначалися коефіцієнти k – частка теплової енергії, що надходить до заготовки, та R – радіус дії джерела у формулі (3.8) для конкретних технологічних режимів ЕЕВО.

Проведемо детальний розгляд запропонованого методу на прикладі дослідження одиничного іскрового розряду на режимі 2-3 генератора ГКІ 300-200А (див. таблицю 3.1) із застосуванням води як робочої рідини, катод – дріт діаметром 0,25 мм (латунь Л63), анод – сталь 12Х18Н10.

Відправними фактичними даними є експериментально зняті осцилограми напруги та струму за час проходження розряду (рисунок 3.4), тобто амплітудно-часові параметри енергії, підведеної в МЕР, і зняті з мікрошліфа геометричні характеристики перетину ерозійної лунки, утвореної цим розрядом, (рисунок 3.5).

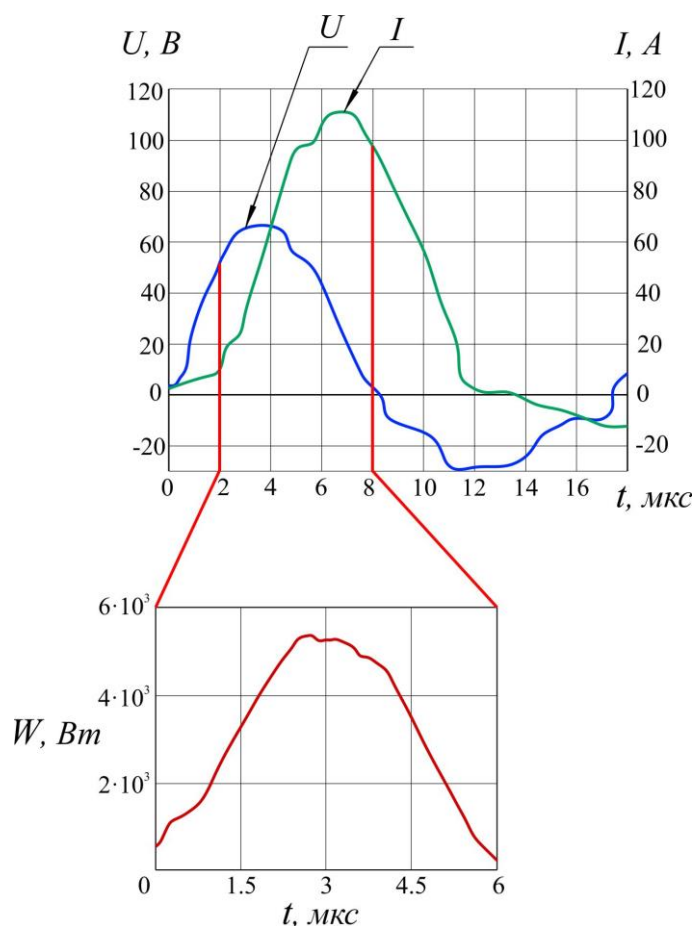


Рисунок 3.4 – Розрахунок потужності теплової дії розряду як функції часу шляхом перемноження миттєвих значень напруги та струму за експериментальною осцилограмою

Оцифровані осцилограми сигналів напруги та струму передаються в MathCAD, і шляхом обчислення добутку $U(t) \cdot I(t)$ знаходимо функцію $W(t)$ – потужність, підведену в МЕР. Енергія розряду визначається інтегруванням потужності по часу.

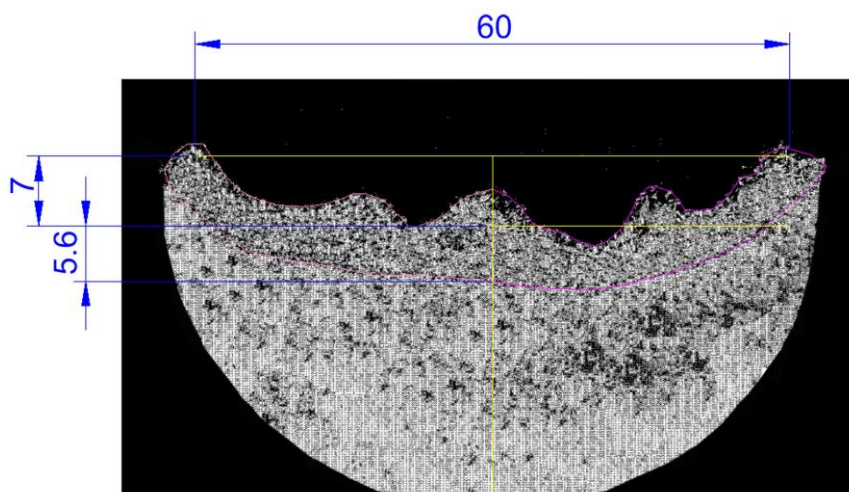


Рисунок 3.5 – Мікрошліф перетину ерозійної лунки (сталь 12X18H10):
 $V_{вун} = 1,09 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$, $V_{перепл} = 2,04 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$ (розміри в мікрометрах)

Використовуючи гаусів розподіл енергії згідно з формулою (3.8) і прийнявши $k = 0,6$ – частка теплової енергії, що надходить до заготовки, та $R = 45 \text{ мкм}$ – радіус дії джерела тепла, отримуємо графіки розподілу густини теплового потоку на різні моменти часу дії іскрового розряду (рисунок 3.6).

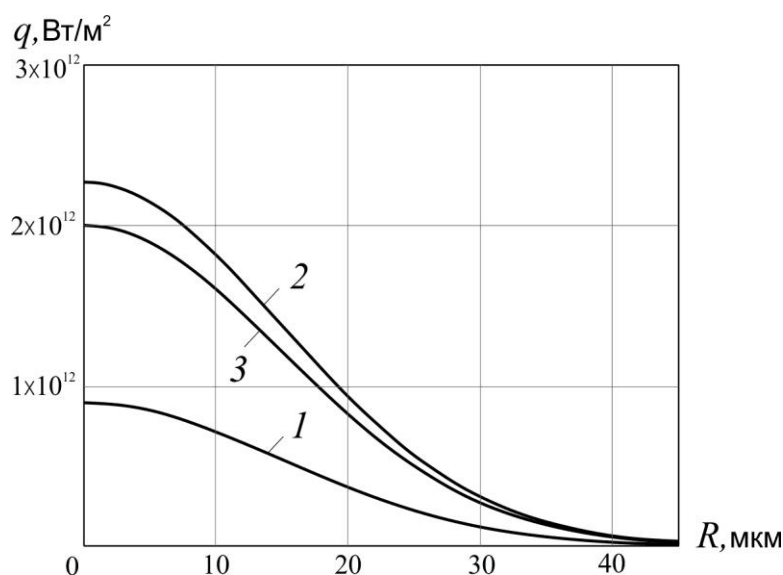


Рисунок 3.6 – Графіки розподілу густини теплового потоку на різні моменти часу дії іскрового розряду: 1 – 1 мкс; 2 – 3 мкс; 3 – 4 мкс

В середовищі САПР визначено площі зон видаленого матеріалу і термічно зміненого (переплавленого) по зображенню поперечного перерізу лун-

ки (див. рисунок 3.5). Обчислено об'єми видаленого і переплавленого матеріалу як фігур обертання навколо вертикальної осі, утворених відповідними зонами на перерізі: $V_{вин} = 1,09 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$, $V_{перепл} = 2,04 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$.

Використовуючи теплофізичні параметри сталі 12Х18Н10, обраховано витрати енергії на випаруваний та переплавлений матеріал. Витрати енергії на випаруваний матеріал складаються з витрат на нагрівання до температури плавлення, плавлення, нагрівання до температури випаровування, випаровування і становлять 0,56 мДж. Витрати енергії на переплавлений матеріал складаються з нагрівання до температури плавлення, плавлення, витрат на перегрів розплаву і становлять 0,17 мДж. Отже, сумарно витрати енергії становлять 0,73 мДж. Це значення обчислено без урахування витрат енергії, що пішла на нагрівання нижніх шарів матеріалу, яку за мікрошліфом поперечного перерізу лунки встановити неможливо. Також не враховано частку матеріалу, яка видалена з лунки у розплавленому стані внаслідок дії гідродинамічних сил високого тиску в каналі розряду (див. підрозділ 3.1).

Інший оцінний розрахунок параметрів лунки і витрат енергії проведено за фактичними експериментальними даними електроерозійного різання повного зйому. Середній розмір одиничної лунки можна порахувати за формулою

$$V_{сер} = \frac{V_{HS} \cdot h \cdot (2 \cdot \Delta + d_{ел})}{f \cdot t \cdot \eta}, \quad (3.9)$$

де V_{HS} – швидкість різання, h – висота заготовки, Δ – величина міжелектродного проміжку, $d_{ел}$ – діаметр дрітчастого електрода, f – частота імпульсів, t – час обробки, η – коефіцієнт використання імпульсів.

За технологічних параметрів ЕЕВО на режимі 2-3: МЕР – 0,033 мм, діаметр дроту – 0,25 мм, частота проходження імпульсів – 22 кГц, коефіцієнт робочих імпульсів – 0,45, товщина деталі – 40 мм, швидкість різання становила 0,6 мм/хв. Отже, об'єм видаленого матеріалу за 1 с становив $1,264 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$, об'єм однієї лунки – $1,277 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$. Отримано задовільний збіг (розходження – 14,6 %) отриманого результату об'єму видаленого матеріалу лунки

з аналогічним результатом розрахунку $V_{перепл}$ за мікрошліфом поперечного перетину.

Для попереднього оцінного розрахунку витрат енергії на утворення ерозійної лунки використовується діючий розрахунковий документ MathCAD, який дає змогу оперативно проводити варіацію параметрами термічних зон.

Приймемо профіль у поперечному вертикальному перерізі лунки у вигляді напівеліпса (рисунок 3.7). Піввісі еліпса 30 мкм і 6,8 мкм вибрані відповідно радіусу і глибини лунки рисунка 3.5.

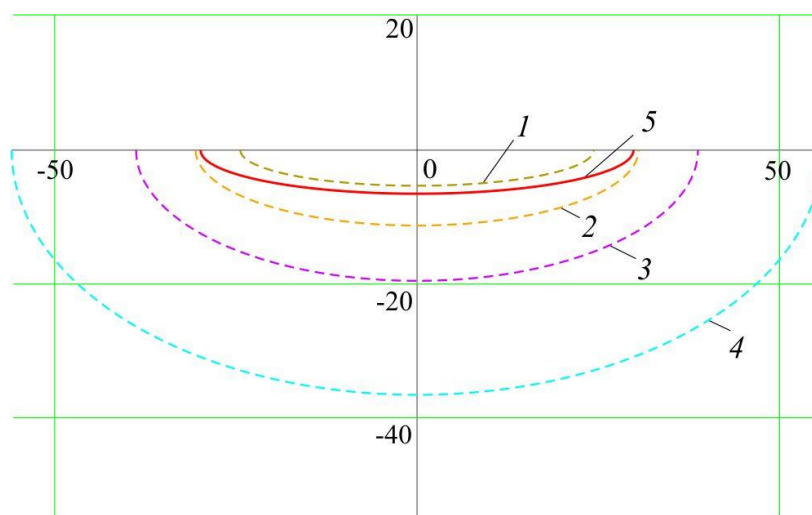


Рисунок 3.7 – Прийнятий напівеліптичний профіль форми ерозійної лунки і зон термічного впливу для оцінного розрахунку витраченої енергії: 1 – границя зони випаруваного матеріалу, 2 – зони розплаву, 3 – зони термічного впливу в діапазоні $T_{\text{плав}} - 727^{\circ}\text{C}$, 4 – зони термічного впливу в діапазоні $727-77^{\circ}\text{C}$, 5 – профіль утвореної лунки (розміри в мкм)

Далі задаємо варіативні параметри розмірів зон термічного впливу у відсотках від глибини лунки: глибина випаруваної зони – 80 %, глибина зони розплаву – 90 %, глибина зони термічного впливу в діапазоні температур $T_{\text{плав}} - 727^{\circ}\text{C}$ – 120 %, глибина зони термічного впливу в діапазоні $727-77^{\circ}\text{C}$ – 250 %.

За прийнятих параметрів обчислюються витрати енергії на утворення кожної зони термічного впливу. Використовуються наступні теплофізичні параметри сталі 12X18H10 [3, 73, 109]. Температура плавлення – 1427 °С, температура випаровування – 2827 °С, питома теплота плавлення – 273 790 Дж/кг, питома теплота випаровування – 6 091 000 Дж/кг. Густина матеріалу, що випаровується, при температурі випаровування – 5861 кг/м³. Параметри розплавленого матеріалу при середній температурі між температурою плавлення і випаровування: густина – 6394 кг/м³, теплоємність – 795 Дж/(кг·град). Густина матеріалу, що плавиться, при температурі плавлення – 7063 кг/м³. Параметри матеріалу, що нагрівається при середній температурі діапазону 20 °С – температура плавлення: густина – 7547 кг/м³, теплоємність – 605 Дж/(кг·град). Параметри матеріалу, що нагрівається при середній температурі діапазону 77-727 °С: густина – 7749 кг/м³, теплоємність – 562 Дж/(кг·град).

Витрати енергії на випаруваний матеріал складаються із витрат на нагрівання до температури плавлення, плавлення, нагрівання до температури випаровування, випаровування і становлять 0,39 мДж. Витрати енергії на переплавлений матеріал складаються з витрат на нагрівання до температури плавлення, плавлення, перегрів розплаву і становлять 0,21 мДж. Витрати енергії на нагрівання зони термічного впливу становлять 0,2 мДж. Витрати енергії на нагрівання шару нижче зони 727 °С – 0,33 мДж. Загальна витрачена енергія становила 1,14 мДж.

Отримані дані витрат енергії разом з геометричними характеристиками видаленої та переплавленої зон ерозійної лунки є опорними даними для наступного, більш точного математичного моделювання процесу утворення лунки і обчислювальних експериментів.

Використовується чисельний розв'язок трифазної нелінійної задачі теплопровідності в середовищі розрахункового математичного пакета COMSOL Multiphysics. Повноцінна нестационарна тривимірна математична

модель враховує, зокрема, латентні енергії плавлення та випаровування, і описана в пункті 2.3.1.

За результатами цифрової обробки осцилограм напруги і струму в момент проходження іскрового розряду (див. рисунок 3.4) у розрахунковій системі задається функція зміни потужності підведеної енергії з часом (рисунок 3.8).

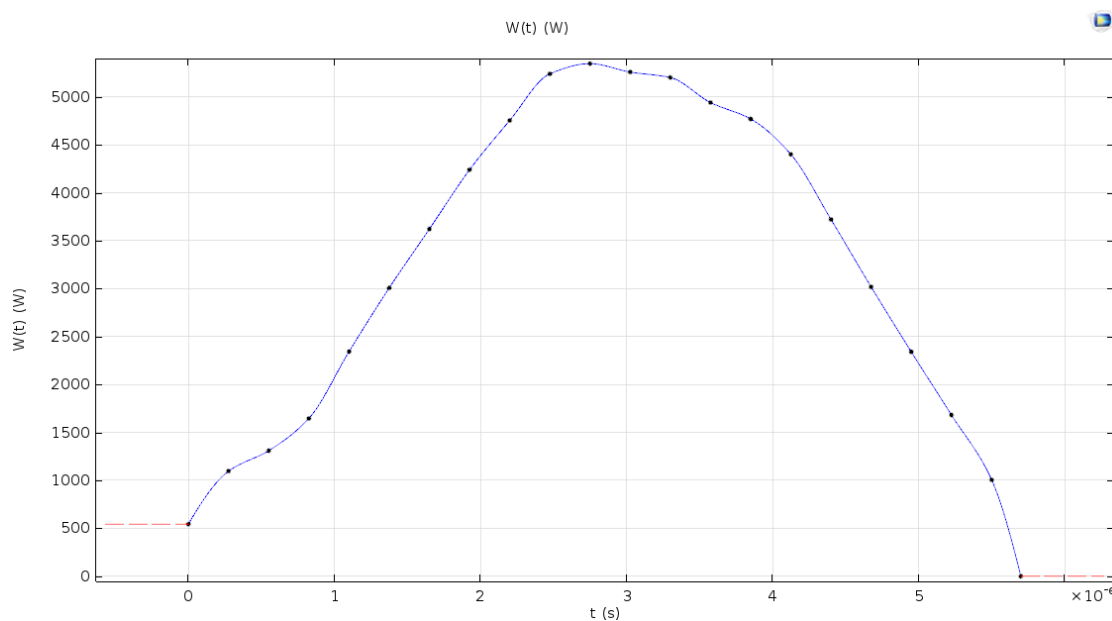


Рисунок 3.8 – Залежність потужності підведеної електричної енергії від часу розряду

За літературними джерелами [3, 73, 109] вводяться довідкові дані теплофізичних параметрів сталі 12X18H10 як функції температури (рисунки 3.9–3.11).

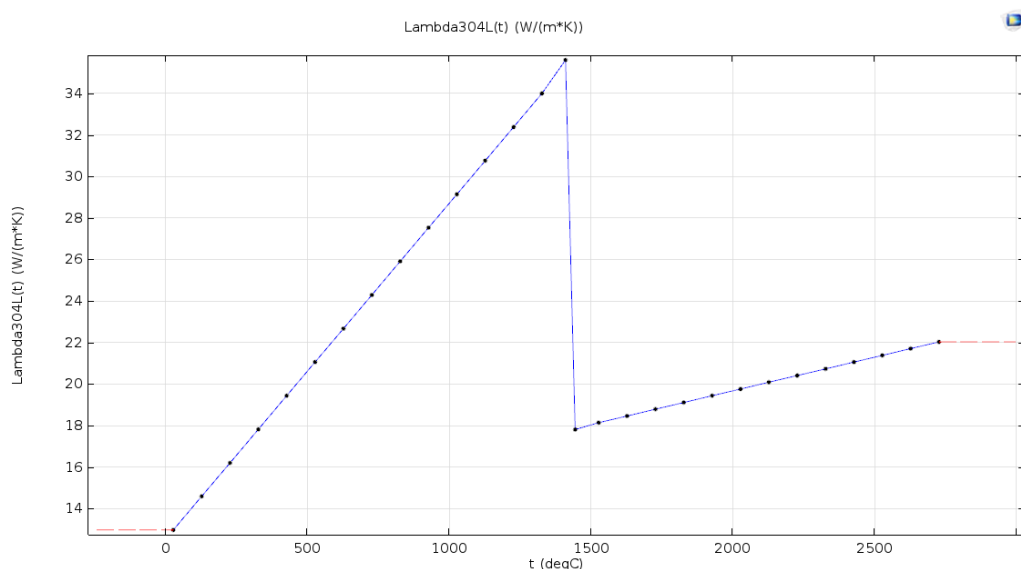


Рисунок 3.9 – Залежність коефіцієнта теплопровідності сталі 12X18H10 від температури

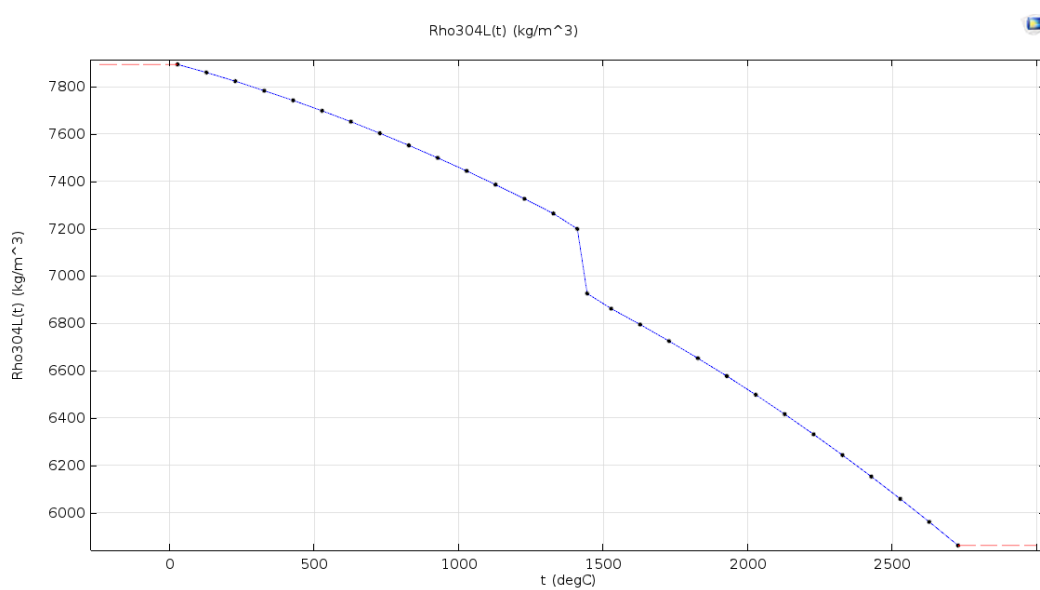


Рисунок 3.10 – Залежність густини сталі 12X18H10 від температури

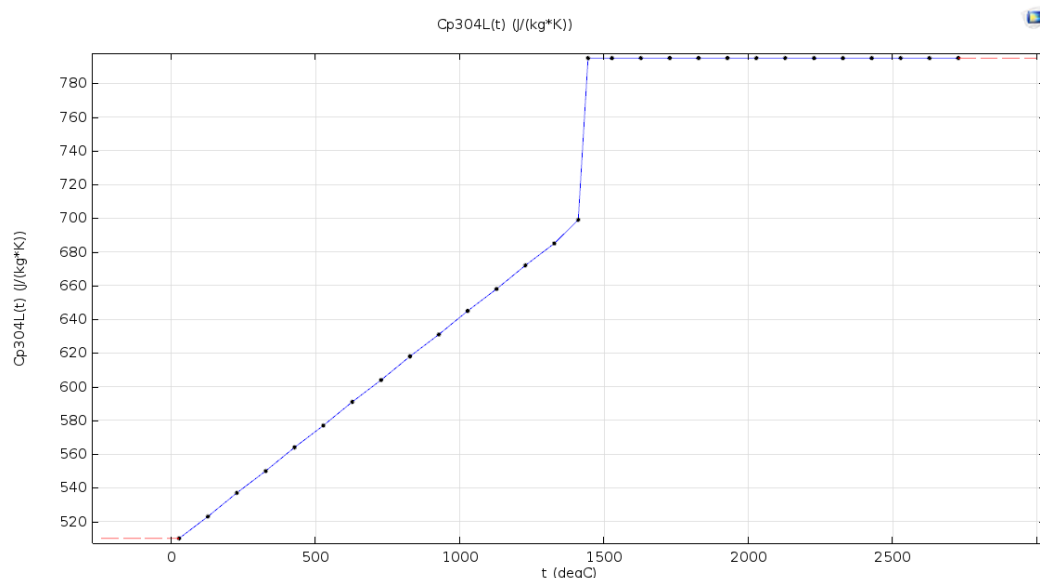


Рисунок 3.11 – Залежність питомої теплоємності сталі 12X18H10 від температури

Далі проводиться обчислювальний експеримент з варіацією вхідних параметрів k – частки енергії, яка йде на теплове руйнування анода, і R – віртуального радіуса джерела тепла у формулі (3.8) гаусового розподілу густини теплового потоку. Параметри вибираються так, щоб геометричні розміри лунки та зони розплаву, отримані в розрахунку (рисунок 3.12), максимально наблизились до відповідних параметрів, визначених за мікрошліфом перетину ерозійної лунки (див. рисунок 3.5).

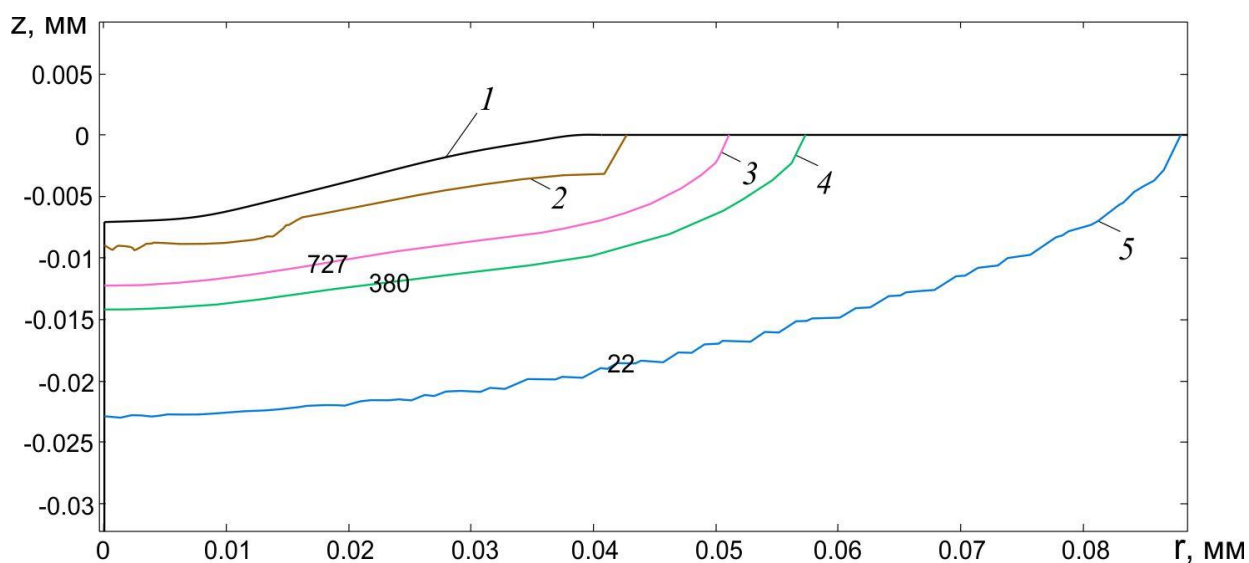


Рисунок 3.12 – Результати розрахунку форми ізофазних поверхонь та ізоTERM теплових полів в аноді, утворених внаслідок дії одиничного розряду: 1 – границя випаруваного матеріалу, 2 – границя розплавленого матеріалу, 3 – 5 – ізоТЕРМИ на момент припинення розряду

Результати розрахунку витрат енергії на утворення лунки і нагрівання поверхневих шарів, за даними моделювання в COMSOL Multiphysics, наступні: витрати енергії на випаруваний матеріал – 0,6 мДж, на переплавлений матеріал – 0,18 мДж, на нагрівання зони термічного впливу – 0,16 мДж, на нагрівання нижніх шарів – 0,21 мДж. Загальна витрачена енергія становить 1,15 мДж.

Як впливає з наведених результатів, отримано досить точну збіжність значення загальної витраченої енергії з попередніми оцінними результатами (розходження менше 1 %). Однак дещо різняться частки витраченої енергії на окремі стадії теплового процесу утворення лунки.

Отже, форма лунки і зони переплавленого металу, визначені за мікрошліфом поперечного перетину (див. рисунок 3.5), дають можливість встановити параметри джерела тепла, утвореного іскровим розрядом, а сам розрахунок додатково визначає розміри зони термічного впливу (зона 3, рисунок 3.13).

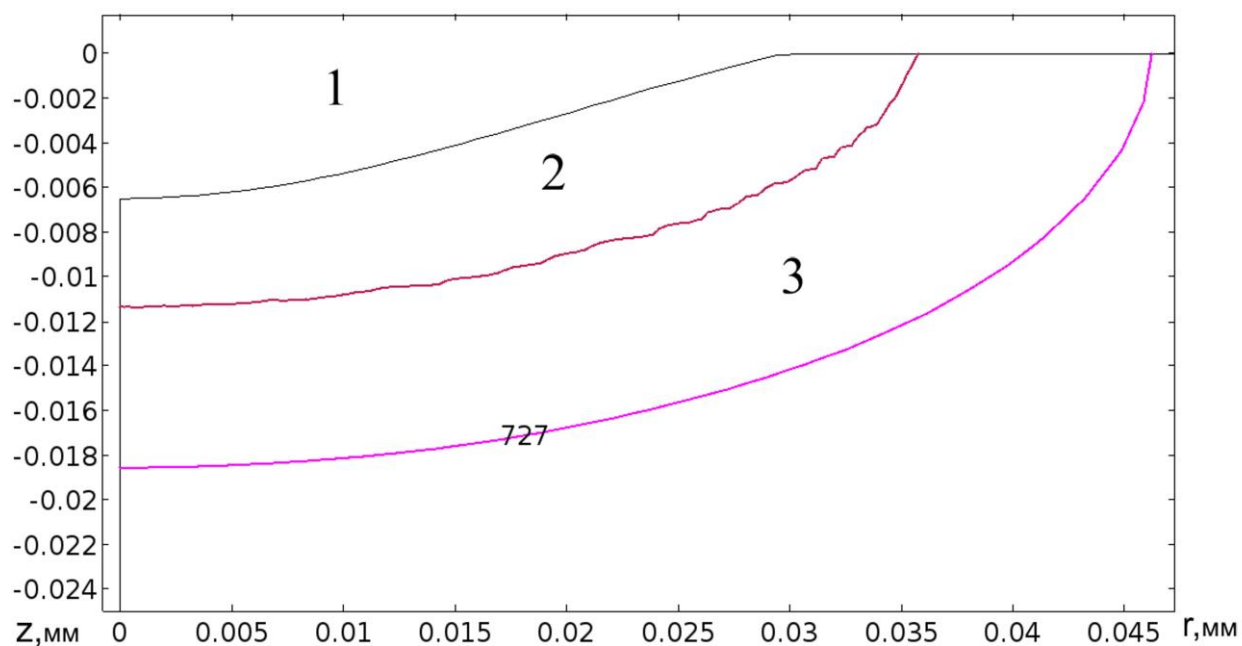


Рисунок 3.13 – Уточнені результати розрахунку ізофазних поверхонь та ізотерм теплових полів з використанням більш щільної сітки методу скінченних елементів: випаруваний матеріал (зона 1), розплавлений матеріал (зона 2) та зона термічного впливу (3), режим 2-3 генератора ГКІ 300-200А

Візуальне представлення розрахованої форми лунки та розподілу теплового поля зображено на рисунку 3.14.

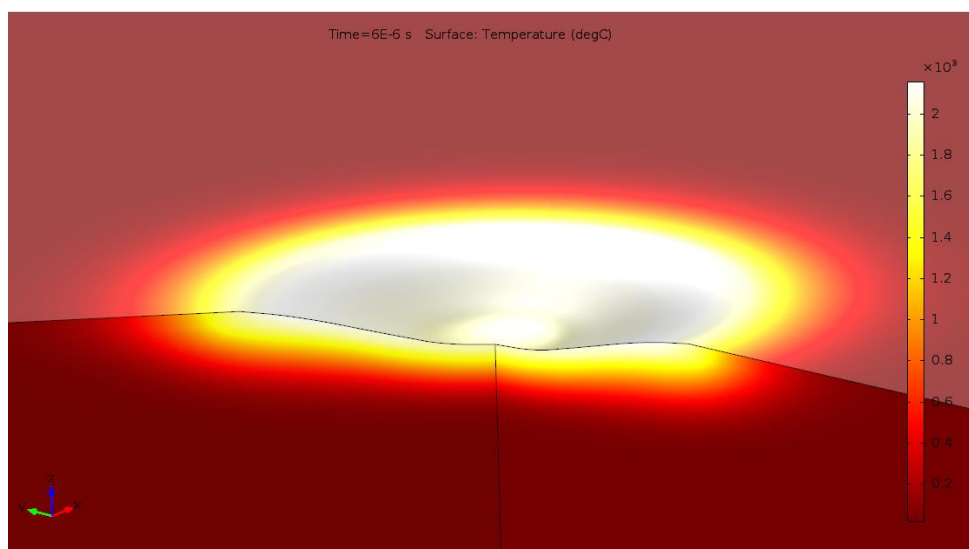


Рисунок 3.14 – Тривимірна візуалізація з вирізаною четвертю кратера електроерозійної лунки і розподілу теплових полів на поверхні та вглиб анода

Таким чином, можна констатувати, що вперше запропоновано експериментально-розрахункову методологію, яка ґрунтується на адаптивному узгодженні результатів точних експериментальних досліджень з даними обчислювального експерименту з варійованими вхідними параметрами та є ефективним інструментом наукових досліджень теплових процесів руйнації матеріалу електрода і дає змогу достатньо адекватно оцінювати параметри джерела тепла, сформованого одиничним іскровим розрядом.

3.2.3 Чисельне моделювання впливу параметрів іскрового розряду на формування ерозійної лунки

Важливим параметром для моделювання процесів формоутворення лунки є радіус R джерела тепла, від якого згідно з формулою (3.5) гаусового розподілу густини теплового потоку залежить сконцентрованість дії іскрового розряду.

Для постійно-смугового дискового розподілу теплового потоку багато дослідників приймали радіус дії джерела рівним радіусу отриманої ерозійної лунки [63, 194]. Для гаусового розподілу густини теплового потоку приймати параметр R рівним радіусу лунки є неправильним. У попередньому підрозділі отриманий параметр R у два рази перевищив радіус кратера лунки, визначений за мікрошліфом.

У своїй визначній роботі, що цитувалася близько 100 разів у подальших дослідженнях, японські вчені Ikaі T., Fujita I., Hashiguchi K. ввели термін «віртуальний (або еквівалентний) радіус подачі теплової енергії» і довели, що він більший, ніж радіус кратера [62]. На основі експериментальних досліджень зі зміною часу імпульсного розряду і відповідним зростанням розмірів утворюваних кратерів вони зробили висновок про розширення плазмової дугової колони з плином часу розряду і запропонували формулу для визначення зростаючого з часом радіуса введення тепла:

$$R(t) = 2.04 \cdot 10^{-3} \cdot I^{0.43} \cdot t^{0.44}, \quad (3.10)$$

де I [А] – миттєве значення амплітуди струму, t [мкс] – плинний час від початку розряду.

І хоча формула є емпіричною, вона широко використовується багатьма дослідниками в сучасному моделюванні процесів ЕЕО і забезпечує, як стверджується, добре узгодження з експериментальними даними [13, 174]. Самі ж автори отримали формулу на основі експериментів з довготривалими іскровими розрядами 300-500 мкс та амплітудним значенням струму 16-26 А, які застосовуються для прошивної ЕЕО. Відповідно і еквівалентний радіус подачі тепла, розрахований за формулою (3.10), становив 220-260 мкм [62], що значно перевищує розміри електроерозійних лунок, отримуваних за ЕЕВО.

У дисертаційній роботі встановлено, що для короткотривалих розрядних імпульсів з високим значенням амплітуди струму, характерних для ЕЕВО, запропонована формула незастосовна. Так, для умов іскрового розряду, розглянутого в попередньому підрозділі, згідно з формулою (3.10) побудовано графік зміни радіуса подачі тепла в період часу дії розряду (рисунок 3.15).

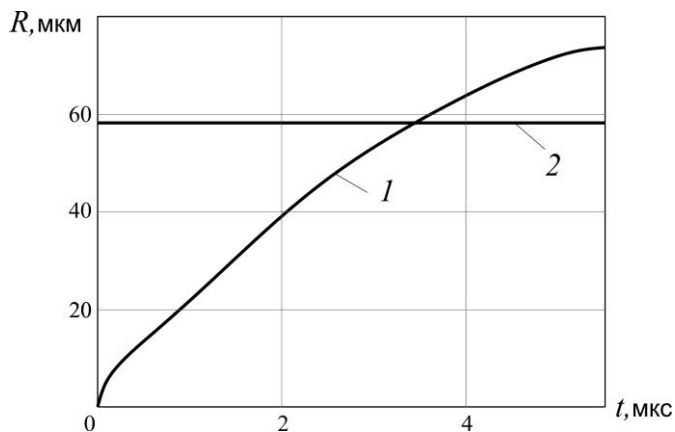


Рисунок 3.15 – Значення радіуса подачі тепла протягом дії одиничного іскрового розряду на режимі 2-3 генератора ГКІ 300-200А: 1 – за формулою (3.10), 2 – постійне значення, визначене за розрахунком попереднього пункту 3.2.2

Провівши розрахунки профілю лунки і теплових полів за описаною вище методикою в COMSOL Multiphysics зі змінним радіусом джерела тепла, отримано результати (рисунок 3.16), які не відповідають реальним параметрам ерозійного кратера, визначеним за мікрошліфом (див. рисунок 3.5). Маємо багатократне перевищення розрахункової глибини лунки зі значно меншим радіусом порівняно з експериментальними даними. Використання значення радіуса подачі тепла, меншого 60 мкм, в початковий період імпульсу до 3,6 мкс (рисунок 3.15) призвело до непомірно швидкого збільшення глибини лунки при повільному зростанні радіуса кратера. З плином часу дії довготривалого імпульсу зростатиме радіус подачі тепла згідно з формулою (3.10), і збільшення радіуса лунки випереджатиме збільшення глибини. Однак для коротких імпульсів ЕЕВО дія джерела припиняється, і форма лунки залишається непропорційно глибокою, що не відповідає жодним експериментальним даним у діапазоні характеристик робочих режимів вирізної електроерозійної обробки.

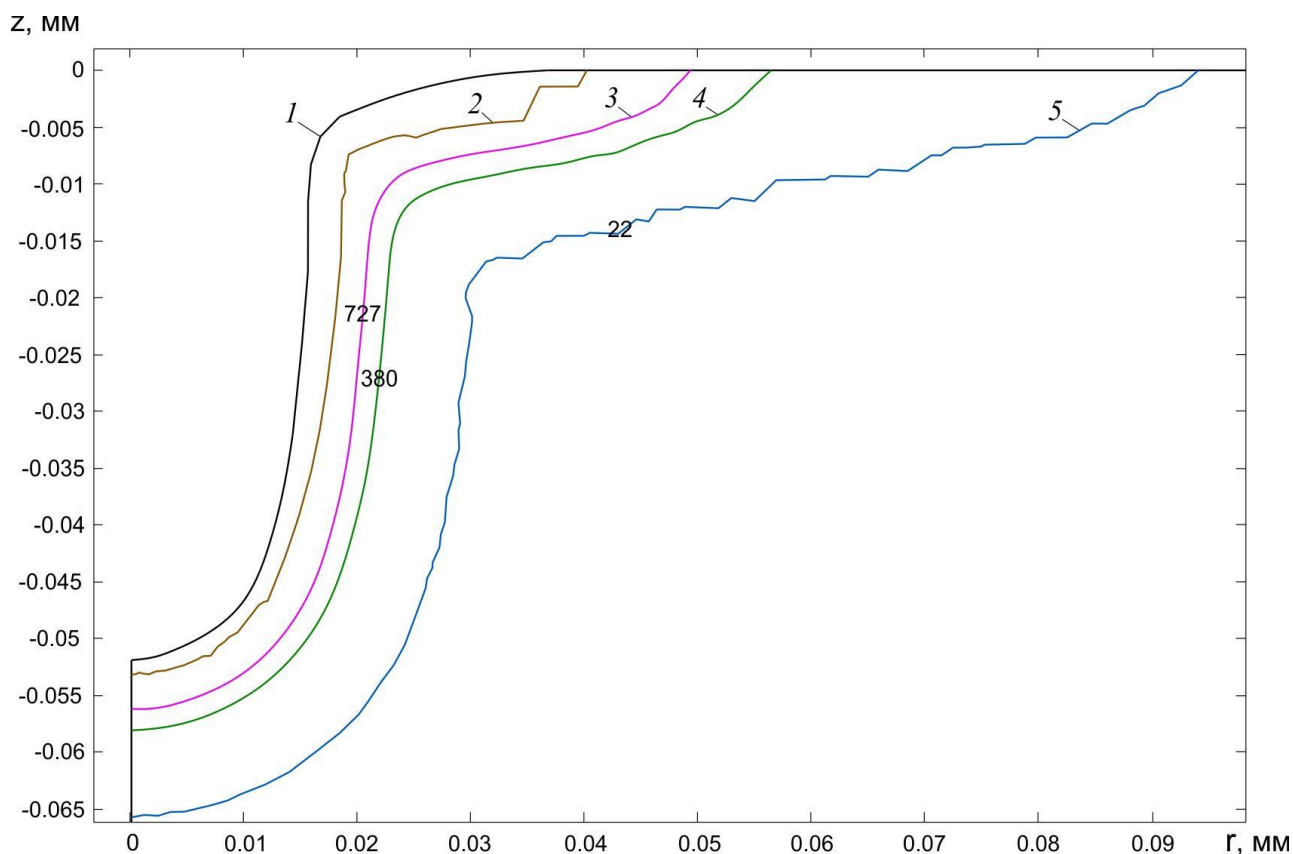


Рисунок 3.16 – Результати розрахунку ізофазних поверхонь та ізоTERM теплових полів за дії одиничного іскрового розряду на режимі 2-3 ГКІ 300-200А при застосуванні змінного радіуса гаусового джерела тепла за формулою (3.10): 1 – границя випаруваного матеріалу, 2 – границя розплавленого матеріалу, 3 – 5 – ізоТЕРМИ на момент припинення розряду

На рисунку 3.17 зображено в якісному порівнянні типові графіки залежності амплітуди струму іскрового розряду від часу для короткотривалих імпульсів за ЕЕВО та довготривалих – за прошивної ЕЕО. Очевидно, формула (3.10) досить точно описує зростання радіуса подачі тепла при постійній амплітуді струму на ділянці DE , що займає переважну частину часу дії довготривалих розрядів. Для типових розрядів, що застосовуються в ЕЕВО, характерне переважання ділянок різкого зростання та спадання струму за майже повної відсутності ділянки з постійним значенням амплітуди струму (рисунок 3.17, крива ABC) і, отже, формула (3.10) не дає адекватного результату.

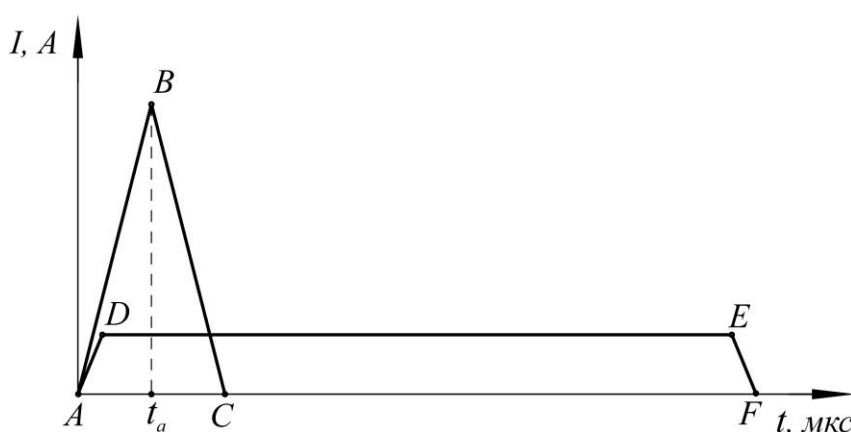


Рисунок 3.17 – Графіки залежності струму іскрового розряду від часу: крива ABC – за ЕЕВО, крива $ADEF$ – за прошивної ЕЕО

Дослідженням зміни радіуса дії джерела тепла іскрового розряду тривалістю 1 – 4 мкс присвячена робота німецьких вчених Spur G. та Schonbeck J. [166].

На основі аналізу природи електричних розрядів в деіонізованій воді [147] зроблено висновок, що керуючою силою розширення плазмового каналу є густина струму в ньому. Тому існує схожість серед різних розрядів у тому самому діелектрику, яка визначається постійністю густини струму в плазмовому каналі. На основі експериментальних даних [106] про розширення розряду конденсатора у воді побудовано графік залежності радіуса плазмового каналу від часу в деіонізованій воді (рисунок 3.18, крива 1).

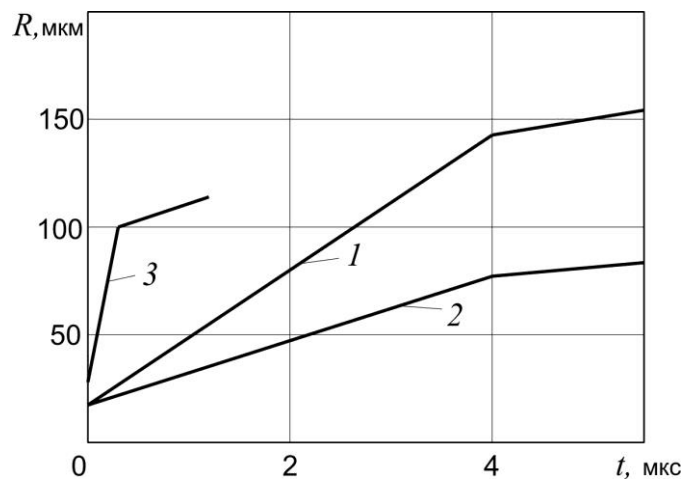


Рисунок 3.18 – Графіки зростання радіуса плазмового каналу розряду з плином часу: 1 – у деіонізованій воді [166], 2 – у водопровідній воді (розрахунок, рисунок 3.13), 3 – у водному розчині АмПАР (розрахунок, рисунок 3.21)

Узагальнюючи дослідження, Spur G. та Schonbeck J. запропонували універсальну формулу зростання з часом радіуса плазмового каналу для коротких електроерозійних імпульсних розрядів:

$$R(t_a, t) = \begin{cases} a + bt, & \text{за } 0 \leq t \leq t_a, \\ R(t_a, t_a) + c \cdot (t - t_a), & \text{за } t_a < t \leq 2t_a; \end{cases} \quad (3.11)$$

де t_a – момент часу закінчення зростання струму розряду (рисунок 3.17), a , b та c – коефіцієнти лінійної функції, що описують поведінку струму на ділянках його зростання і спадання відповідно, залежно від рідкого середовища, в якому відбувається розряд.

Для електроерозійних іскрових розрядів у середовищі деіонізованої води формула (3.11) набуває вигляду [166]:

$$R(t_a, t) = \begin{cases} 17.14 + 31.43t, & \text{за } 0 \leq t \leq t_a, \\ R(t_a, t_a) + 7.5 \cdot (t - t_a), & \text{за } t_a < t \leq 2t_a. \end{cases} \quad (3.12)$$

Проведені розрахунки форми електроерозійної лунки і зони термічного впливу на основі математичної моделі попереднього пункта 3.2.2 із застосуванням формули (3.12) для змінного радіуса джерела тепла не дали результатів, які б збігалися з параметрами електроерозійної лунки за мікрошліфом (рисунок 3.5), у зв'язку з тим, що остання отримана в експериментах у середовищі водопровідної води (питома електропровідність – 40 мкСм/см). Тому в результаті виконаних обчислювальних експериментів з підбором коефіцієнтів формули (3.11) встановлено, що для середовища водопровідної води застосовна формула зростання радіуса джерела тепла у вигляді

$$R(t_a, t) = \begin{cases} 17.14 + 15t, & \text{за } 0 \leq t \leq t_a, \\ R(t_a, t_a) + 4 \cdot (t - t_a), & \text{за } t_a < t \leq 2t_a. \end{cases} \quad (3.13)$$

За значення параметра $t_a = 4$ мкс у формулі (3.13), визначеного за осцилограмою сигналу амплітуди струму розряду (рисунок 3.4), отримано найбільш адекватний збіг розрахункових (рисунок 3.19) і експериментальних (рисунок 3.5) параметрів електроерозійної лунки та зони переплаву матеріалу анода.

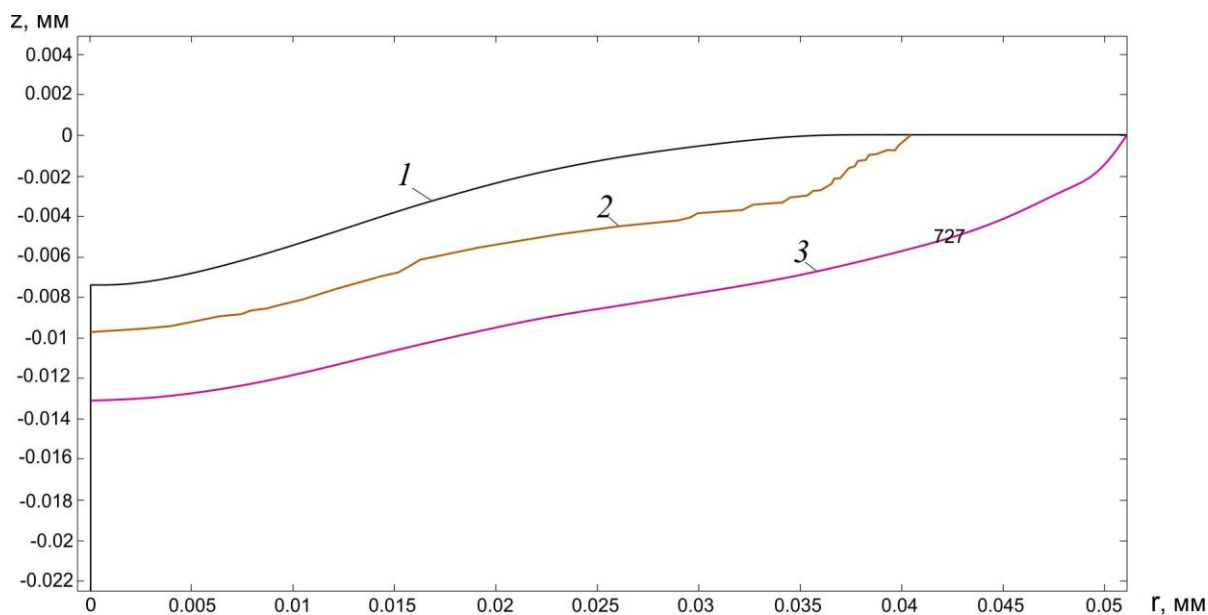


Рисунок 3.19 – Результати розрахунку ізофазних поверхонь та ізотерм теплових полів за дії одиничного іскрового розряду на режимі 2-3 ГКІ 300-200А при застосуванні змінного значення радіуса гаусового джерела тепла у водопровідній воді (питома електропровідність – 40 мкСм/см): 1 – границя випаруваного матеріалу, 2 – границя розплавленого матеріалу, 3 – ізотерма 727 °С на момент припинення розряду

Слід відзначити, що подальші дослідження за вищенаведеною експериментально-розрахунковою методикою з варіацією режимів роботи генераторів електричних імпульсів (таблиця 3.1), які застосовуються для ЕЕВО, показали задовільну збіжність теоретичних і експериментальних результатів, що підтверджує правомірність застосування формули (3.13). Однак дослідження проводилися з використанням тільки водопровідної води Черкаського водогону. Досвід впровадження електроерозійного вирізного обладнання в різних регіонах України та за кордоном свідчить, що характеристики водопровідної води суттєво різняться залежно від джерела забору і системи водопідготовки аж до виникнення необхідності корекції технологічних режимів ЕЕВО. Тому на основі запропонованої методики слід проводити додаткові дослідження для уточнення коефіцієнтів у формулі (3.13) і формувати базу технологічних даних для системи автоматизованого проектування технологі-

чних процесів комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дрітним електродом (розділ 6).

Суттєво розширює канал іскрового розряду за інших рівних умов застосування водних розчинів амфолітних поверхнево-активних речовин (Ам-ПАР) як робочої рідини для ЕЕВО [221, 233]. За рахунок інтенсифікації промивання міжелектродного проміжку, зміни умов охолодження та утворення адсорбційних плівок ПАР на поверхні електродів змінюються просторово-енергетичні характеристики каналу розряду, розподіл енерговиділення.

Проведено обчислювальні експерименти для встановлення параметрів розширення каналу іскрового розряду за умов його проходження в середовищі водних розчинів АмПАР. За осцилограмами сигналів напруги та струму (рисунок 3.20), знятими протягом проходження одиничного іскрового розряду на режимі генератора МГКІ (таблиця 3.1), встановлено, що тривалість дії імпульсу становила 1,2 мкс, $t_a = 0,3$ мкс.

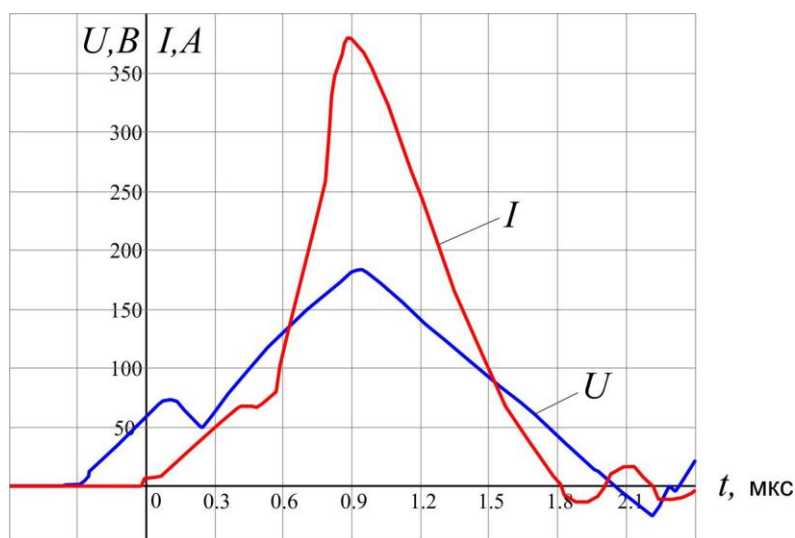


Рисунок 3.20 – Осцилограми напруги та струму за проходження одиничного іскрового розряду на режимі 4 генератора МГКІ (таблиця 3.1) в середовищі водного розчину АмПАР (концентрація $c = 0,05$ %)

Шляхом підбору коефіцієнтів у формулі (3.11) зростання з часом радіуса плазмового каналу отримано результати розрахунку форми електроерозій-

ної лунки і зони переплавленого матеріалу (рисунок 3.21), що відповідають аналогічним параметрам, визначеним за мікрошліфом поперечного перетину лунки (рисунок 3.22).

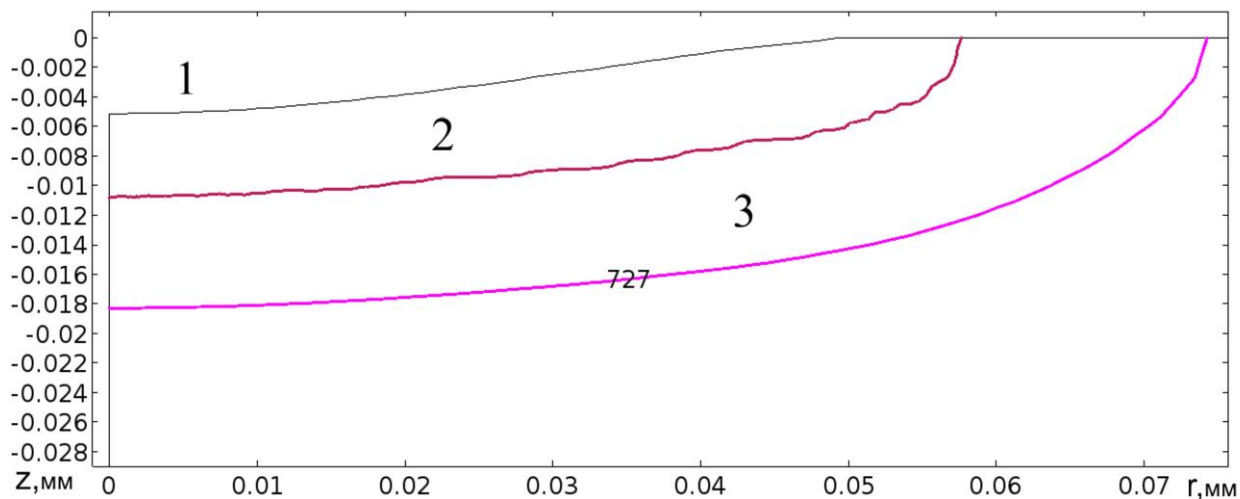


Рисунок 3.21 – Уточнені результати розрахунку ізофазних поверхонь та ізотерм теплових полів з використанням більш щільної сітки методу скінченних елементів: ($R_k = 100$ мкм, $E_a = 0,14 \cdot E_i$): 1 – випаруваний матеріал, 2 – зона переплавленого матеріалу, 3 – зона термічного впливу; (сталі 12X18H10, водний розчин АмПАР ($c = 0,05$ %))

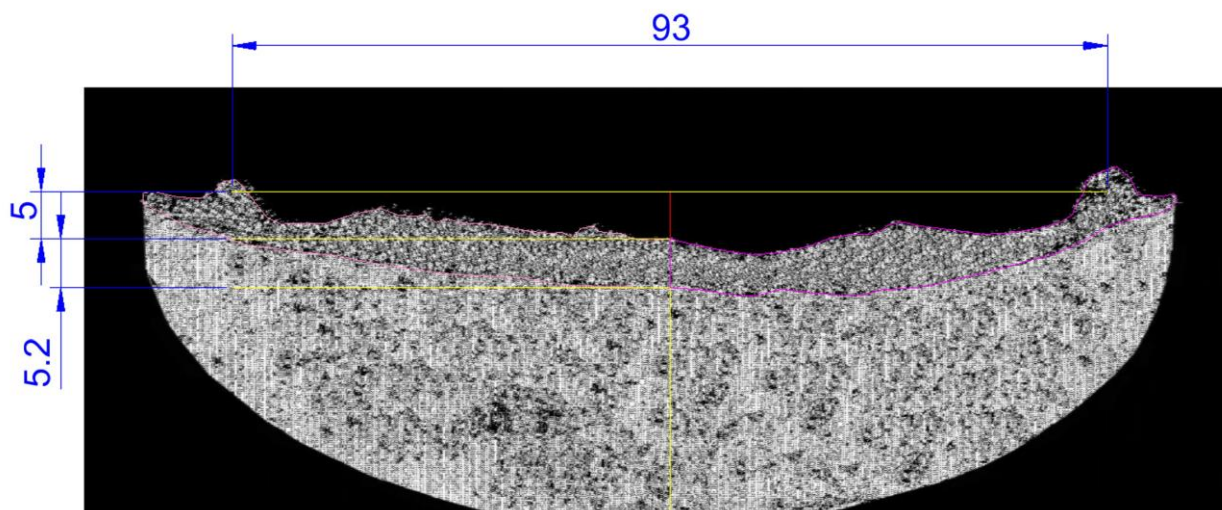


Рисунок 3.22 – Мікрошліф перетину ерозійної лунки (сталі 12X18H10, водний розчин АмПАР ($c = 0,05$ %)): $V_{вип} = 2,21 \cdot 10^{-14}$ м³, $V_{перепл} = 4,11 \cdot 10^{-14}$ м³

Таким чином, встановлено, що у випадку застосування водних розчинів АмПАР як робочої рідини за ЕЕВО найбільш адекватний опис процесу розширення каналу розряду можна здійснити за формулою

$$R(t_a, t) = \begin{cases} 17 + 350t, & \text{за } 0 \leq t \leq t_a, \\ R(t_a, t_a) + 70 \cdot (t - t_a), & \text{за } t_a < t \leq 4t_a, \end{cases} \quad (3.14)$$

якій відповідає крива 3 на рисунку 3.18.

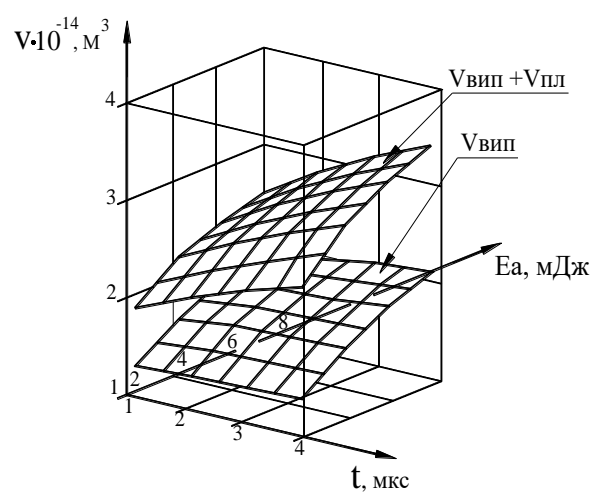
Аналізуючи отримані графіки характеру розширення каналу розряду для різних робочих середовищ (рисунок 3.18), можна зробити ряд важливих практичних висновків. Відомо, що чим більше радіус ерозійного кратера превалює над його глибиною, тим меншу шорсткість поверхні після ЕЕВО буде отримано внаслідок багатократного накладання і перетину неглибоких лунок. З порівняння графіків видно, наскільки швидше розширення каналу розряду зумовлює середовище деіонізованої води, на відміну від середовища водопровідної води. Це, зокрема, пояснює застосування деіонізованої води як робочої рідини на дорогих зарубіжних електроерозійних вирізних верстатах, де якість поверхні обробленої деталі вища, ніж на дешевших, у тому числі вітчизняних, верстатах із застосуванням водопровідної води. Водночас з отриманих графіків видно суттєвий вплив на швидкість розширення каналу розряду добавок АмПАР у робочу рідину, застосування яких приводить навіть до посилення ефекту збільшення радіуса каналу, ніж в деіонізованій воді.

Графіки рисунка 3.18 разом з відповідними формулами (3.12) – (3.14) дають кількісний опис процесу розширення плазмового каналу іскрового розряду в середовищі водопровідної води (питома електропровідність – 40 мкСм/см) та водному розчині АмПАР ($c = 0,05 \%$), що впливає на якість обробленої поверхні, містять новизну і мають самостійне наукове значення.

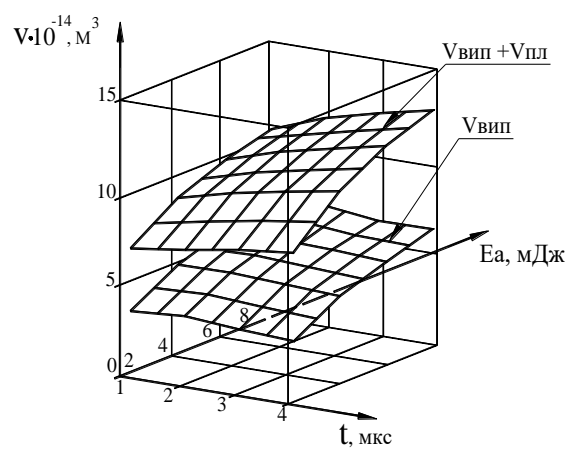
У ході обчислень та порівняння результатів з експериментальними даними було встановлено ряд наукових засад, які є визначальними при виборі амплітудно-частотних характеристик режимів обробки та проектуванні джерел живлення для ЕЕВО.

Виходячи з аналізу отриманих результатів чисельного моделювання теплових процесів у зоні дії анодної плями розряду, що зображені на рисунках 3.23, 3.24, встановлено, що в обраному діапазоні зміни параметрів одиничного іскрового розряду найбільший вплив на об'єми як випаруваної, так і рідкої фази матеріалу анода (Сталь 45) мають просторово-енергетичні характеристики каналу розряду, тобто площа дії плоского висококонцентрованого джерела тепла та загальна енергія, що виділилася на електроді (E_a). При цьому фактично домінує площа дії плоского джерела тепла. Так, за $E_a = 2$ мДж і $\tau = 1$ мкс при зростанні діаметра каналу розряду від 60 мкм до 200 мкм площа дії джерела зростає від $2,827 \cdot 10^{-3}$ мм² до $31,415 \cdot 10^{-3}$ мм² (в 11,11 разу), максимальна густина потужності в електродній плямі відповідно в такій же пропорції зменшується (від $q(r,t)_{\max} = 3,2 \cdot 10^8$ Вт/см² до $q(r,t)_{\max} = 2,88 \cdot 10^7$ Вт/см²), а об'єм випаруваного матеріалу зростає від $1,301 \cdot 10^{-14}$ м³ до $3,284 \cdot 10^{-14}$ м³, тобто майже в три рази. Зростання енергії E_a з 2 мДж до 8 мДж (в чотири рази) приводить до збільшення об'єму випаруваного матеріалу в 1,4-2,2 разу (залежно від площі плоского джерела тепла). Подібні співвідношення спостерігаються і відносно рідкої фази. Зміна тривалості розряду від 1 мкс до 4 мкс при постійній підведеній до електрода енергії має слабо виражений екстремальний вплив (6-12 % залежно від густини потужності в електродній плямі) на об'єми матеріалу електрода, що пройшов фазові перетворення (рис. 3.23). При цьому розрахункові дані узгоджуються із експериментом з похибкою, що не перевищує 10 % в усьому дослідженому діапазоні.

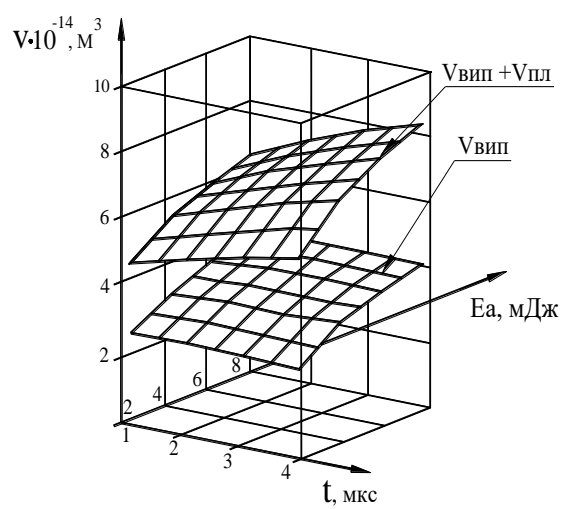
$$d_{\text{л}} = 60 \text{ мкм}$$



$$d_{\text{л}} = 160 \text{ мкм}$$



$$d_{\text{л}} = 100 \text{ мкм}$$



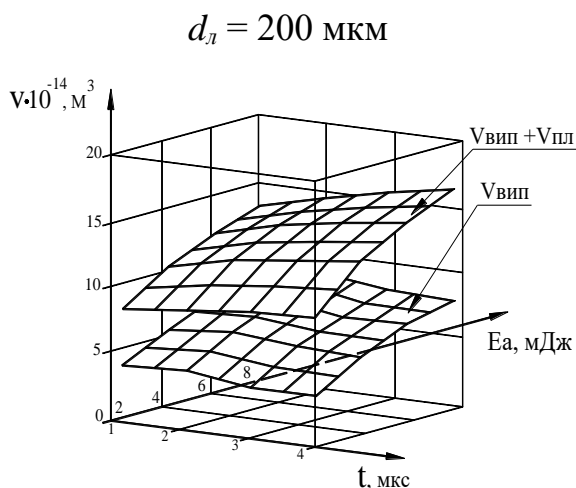


Рисунок 3.23 – Розрахункові залежності об’ємів матеріалу електрода, що зазнав фазових перетворень, від тривалості розряду (t) та енергії, що виділилася на аноді (E_a), для різних діаметрів плоского поверхневого висококонцентрованого джерела тепла (матеріал анода – Сталь 45): $V_{пл}$ – об’єм розплавленої фази; $V_{вип}$ – об’єм випаруваної фази

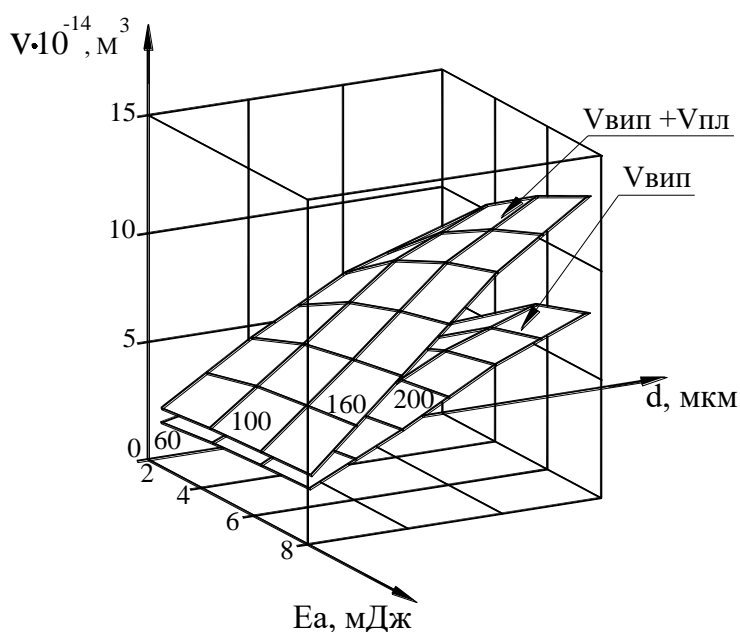


Рисунок 3.24 – Розрахункові залежності об’ємів матеріалу електрода, що зазнав фазових перетворень, від діаметра плоского поверхневого висококонцентрованого джерела тепла (d) та енергії, що виділилася на аноді (E_a) (матеріал анода – Сталь 45,): $V_{пл}$ – об’єм розплавленої фази; $V_{вип}$ – об’єм випаруваної фази

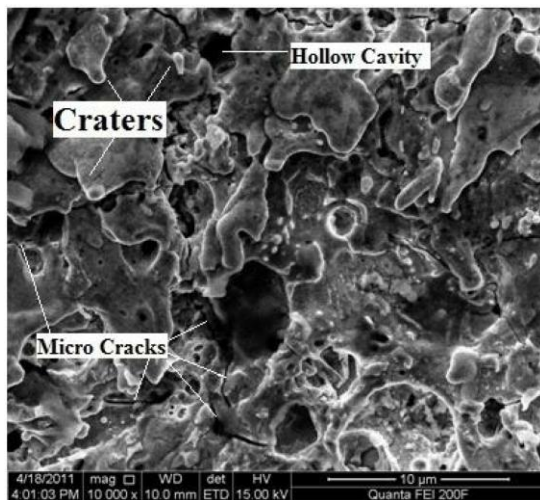
Варто відзначити, що об'єми рідкої фази в 1,8-2,2 разу перевищують об'єми випаруваного матеріалу електрода, хоча у видалених продуктах ерозії їх частка знаходиться в межах 5-30 % , тобто перехід у рідкий стан ще означає видалення матеріалу електрода з ерозійної лунки. Це підтверджує тезу про те, що наявність у лунці суттєвого об'єму рідкої фази, практично не впливаючи на баланс енергії, може помітно впливати на винос маси з ерозійної лунки і тим уже суттєво змінювати питому енергію руйнування. У зв'язку з цим у подальших оцінках скористаємося поняттям коефіцієнта викиду ($K_{вик}$), визначивши його як відношення об'єму викинутої речовини до всього об'єму, що зазнав агрегатних перетворень. При всій складності проблеми можна вважати доведеним те, що в діапазоні енергій розряду $E \approx 3-10$ мДж і тривалості імпульсу $t \approx 1-3$ мкс для мінімізації енергетичних витрат на руйнацію електрода необхідно (при виконанні умов максимальної теплової асиметрії розряду в бік деталі) сформувати джерело тепла максимально можливої площі та створити умови, що забезпечать максимальний коефіцієнт викиду матеріалу з ерозійної лунки.

3.3 Глибина зони структурних змін у поверхневих шарах обробленої поверхні як функція тривалості та густини потужності в каналі розряду

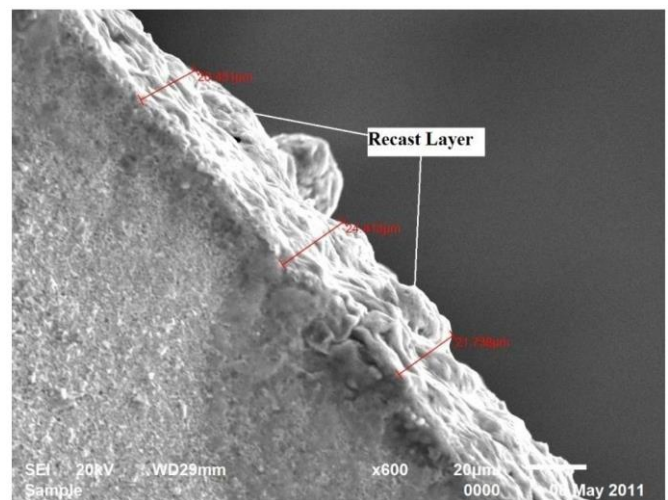
Руйнування матеріалу заготовки за ЕЕВО відбувається внаслідок дії іскрових розрядів, тобто термічного руйнування концентрованим джерелом тепла. Тому на обробленій поверхні спостерігаються деякі небажані недоліки, особливо після чорнового різку повного зйому, що виконується на режимах з максимальною енергією розрядів з метою забезпечення високої продуктивності процесу.

Електроерозійно оброблена поверхня складається з переплавленого шару, зони термічного впливу та мікротріщин, паралельних або перпендикулярних оброблювальній поверхні.

Переплавлений шар [52] розглядається як головний недолік робочої поверхні, обробленої ЕЕВО, оскільки це негативно впливає на експлуатаційні характеристики виробів, зокрема на стійкість і продуктивність штамів. Переплавлений шар – це тверде покриття на робочій поверхні, що утворюється внаслідок повторного затвердіння розплавленого залишкового матеріалу, який не був повністю видалений під час процесу [136]. Відновний шар складається з кратерів великого розміру, порожнин та мікротріщин через теплові залишкові напруження. На рисунку 3.25 показано зображення робочої поверхні при піковому струмі 100 А, T_{on} 115 машинних одиниць, T_{off} 4 машинні одиниці і SV 30 В [87], отримані за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ). З рисунка 3.25, а видно, що поверхневий шар був пошкоджений через високу теплову енергію. На рисунку 3.25, б спостерігається переплавлений шар середньої товщини 22 мкм, який не може бути проігнорований при експлуатації кінцевого виробу.



а)



б)

Рисунок 3.25 – СЕМ зображення електроерозійно обробленої поверхні [87]: а) поверхня після ЕЕВО; б) перетин робочої поверхні

При високій енергії розряду значна кількість розплавленого металу перетворюється на парову фазу, яка при охолодженні утворює порожнини [94]. Тріщини утворюються через високі теплові напруження, що виникають вна-

слідок швидкого нагрівання та охолодження в зоні іскроутворення. Відповідно до досліджень, проведених у роботі [94], на глибину шару переплавлення та кількість мікротріщин в основному впливають піковий струм і тривалість імпульсу. Товщина переплавленого шару збільшується зі збільшенням пікового струму та часу дії імпульсу. Тому, щоб поліпшити якість поверхні, у процесі ЕЕВО завжди потрібна одна чи декілька додаткових операцій різання. Ці операції обробки різанням мають виконуватися при низькій енергії розряду (наприклад низький піковий струм та низький час імпульсу) з належним значенням встановленої напруги.

Отже, виникає важливе для практики проектування технологічних процесів ЕЕВО і подальшого покращення стану обробленої поверхні завдання, яке полягає у встановленні кількісних кореляційних зв'язків між амплітудно-частотними характеристиками електричних імпульсів та глибиною зони структурних змін у поверхневих шарах обробленої поверхні.

Визначені параметри теплової дії одиничних розрядів використовувалися для дослідження параметрів поверхневих шарів внаслідок дії серії розрядів при електроерозійному вирізанні. При цьому прийнято такі припущення: міжелектродний проміжок відновлюється до початкового стану через діелектричне промивання; ефект взаємодії кількох іскрових розрядів можна ігнорувати; кратер, утворений розрядом, є однаковим при одноімпульсному та багатоімпульсному розрядних процесах.

Важливим питанням є вибір схеми розташування іскрових розрядів на оброблювальній поверхні для моделювання ЕЕВО.

Загальноновизнано, що виникнення іскрових розрядів за ЕЕВО – це стохастичний процес. Стохастичний характер процесу пояснюється такими факторами, як коливання напруги та струму, розкладання та розподіл діелектрика, випадкова іонна міграція, поверхневі характеристики електродів, взаємодія між двома послідовними розрядами та наявність уламків частинок [195].

Okada A. та ін. [123] досліджували розподіл місця розряду за допомогою високошвидкісної системи спостереження для ЕЕВО-процесу. Високош-

видкісна камера в поєднанні з мікроскопом була використана для зйомки оброблюваної ділянки під час процесу. Проаналізовані зображення дали можливість спостерігати розподіл і локалізацію місць розрядів. Вивчено вплив смуги пропускання сервоприводу, періоду імпульсу та швидкості подачі приводу на розподіл іскрових розрядів. Nan F. та ін. [50] запропонували метод пошуку місць проходження розряду для моделювання ЕЕВО. Точка розряду визначалася таким чином, що найменша величина проміжку давала більшу ймовірність розряду.

Однак визначити цю найближчу точку зі 100 % визначеністю неможливо через випадковий характер процесу. Виникнення шламу скоротить фактичну відстань між дротяним електродом та заготовкою. Бульбашки в діелектричній рідині можуть впливати на ефективну провідність у місцевій зоні, впливаючи, таким чином, на діелектричну пробивну здатність.

У дисертаційній роботі прийнято припущення, що найбільш імовірне місце пробою іскрового розряду – на облямовувальному буртику попередньої лунки (рисунок 3.26).

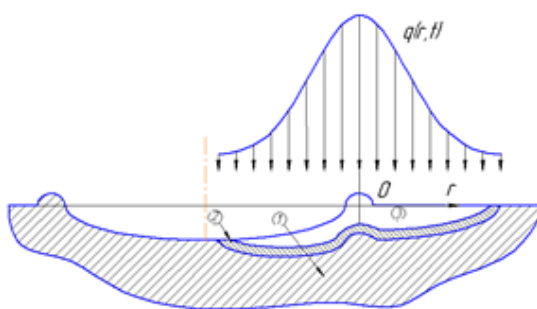


Рисунок 3.26 – Схема дії теплового джерела іскрового розряду при пробої на облямовувальному буртику попередньої лунки

Запропоновано схему регулярного покриття ділянки розрядами (рисунок 3.27). Враховуючи висоту деталі, швидкість різання, частоту робочих імпульсів, для основних режимів ЕЕВО розраховується щільність покриття ді-

лянки поверхні за чорнового різку та за повторними проходами (рисунок 3.28).

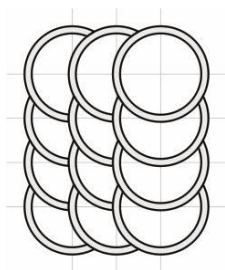


Рисунок 3.27 – Схема регулярного покриття ділянки поверхні послідовністю іскрових розрядів

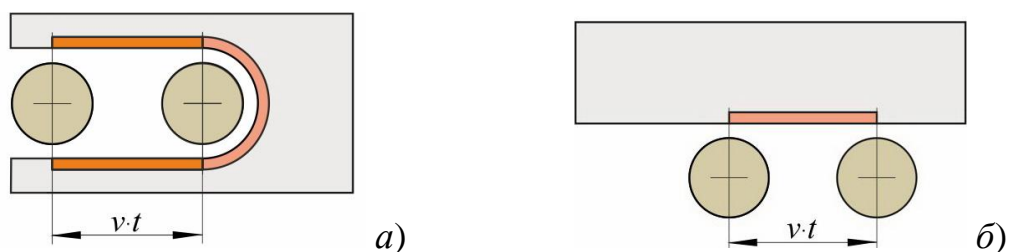


Рисунок 3.28 – Визначення площі ділянки поверхні, яка покривається іскровими розрядами за час t зі швидкістю руху дротяного електрода v : а) за чорнового різку; б) за повторними проходами

За вищезазначених умов проведено моделювання процесів електроерозійного руйнування матеріалу і утворення термічно змінених приповерхневих шарів серією послідовних розрядів, результати якого зображено на рисунку 3.29.

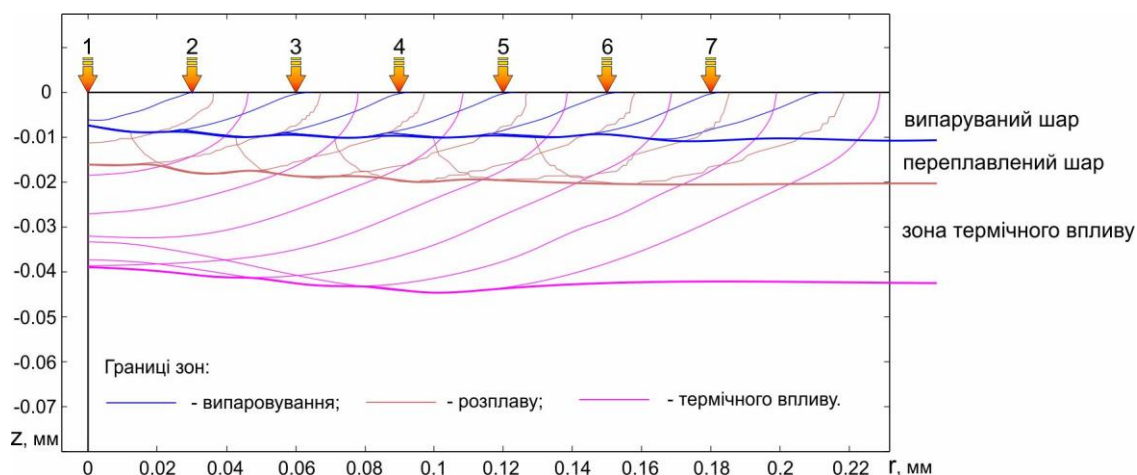


Рисунок 3.29 – Результати чисельного моделювання теплової дії семи послідовних розрядів (матеріал – Сталь 45, $t_i = 5,5$ мкс, $Rk = 58$ мкм, $Ea = 2,9$ мДж)

Теоретичні розрахунки товщини переплавленого шару корелюють з характеристиками переплавленого шару на Сталі 45, експериментально отриманими за електроерозійного дріт'яного вирізання повного зйому на відповідному режимі генератора ГКІ 300-200А (рисунок 3.30).

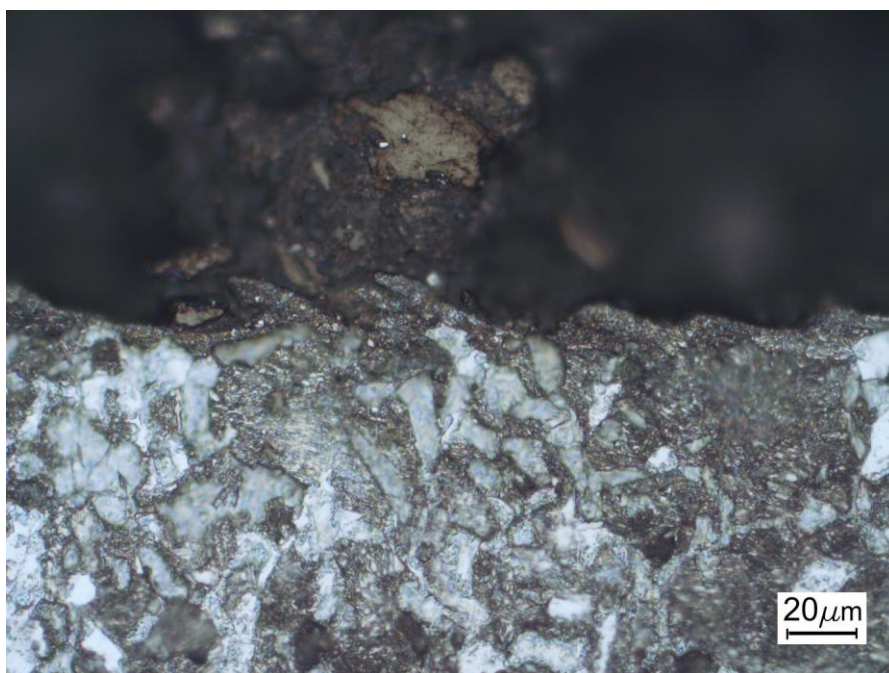


Рисунок 3.30 – Мікрошліф приповерхневих шарів (Сталь 45) після чорнового різку ЕЕВО

Більш детальний аналіз отриманих результатів і порівняння їх з експериментальними даними при обробці інструментальних сталей проведено з використанням підходу, запропонованого Liu J. F. та Guo Y. B. в аналогічних дослідженнях для прошивної ЕЕО [96].

Моделювання утворення «білого шару» та фазових перетворень виконано на основі схеми розподілу теплових полів, зображеної на рисунку 3.31.

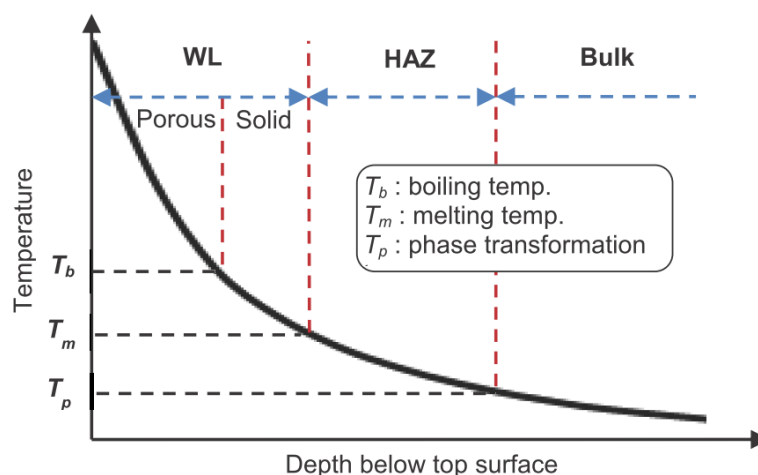


Рисунок 3.31 – Розподіл температури при формуванні «білого шару» та зони термічного впливу (ЗТВ) [96]

На верхньому шарі, коли температура матеріалу буде вищою за температуру кипіння (T_b), матеріал буде випаровуватися в діелектрик. Частково випарувані матеріали охолоджуються до уламків і вимиваються діелектричним потоком, а решта повторно осідає на поверхні, утворюючи пористий білий шар.

У підповерхневому шарі максимальна температура матеріалу нижча за температуру кипіння (T_b), але вища за температуру плавлення (T_m), матеріал спочатку плавиться під час дії розряду, а потім повторно твердне до твердого білого шару внаслідок швидкого охолодження. Наступний підповерхневий шар під твердим білим шаром вважається ЗТВ, максимальна температура матеріалу нижча за температуру плавлення, але вища за температуру фазового перетворення (T_p). Хоча температура в ЗТВ недостатньо висока для розплавлення матеріалів, ЗТВ все одно зазнає складного фазового перетворення під

час розряду та швидкого охолодження. Для шару матеріалу, що має максимальну температуру, нижчу за температуру фазового перетворення (T_p), матеріал вважається таким, що залишається з характеристиками основного матеріалу.

Проведено чисельне моделювання дії дев'яти послідовних іскрових розрядів з параметрами, що відповідають режиму 2-3 генератора ГКІ 300-200А. Матеріал анода – інструментальна штампова сталь Х12Ф1. Встановлено (рисунк 3.32), що товщина переплавленого шару становить приблизно 10-12 мкм. Це збігається зі значеннями товщини «білого шару», визначеними за мікрошліфом (рисунк 3.33) в експериментальних дослідженнях приповерхневих шарів сталі Х12Ф1 на відповідному режимі обробки. При порівнянні теоретичних і експериментальних результатів слід зважати на нечітку верхню границю «білого шару», який складається з суцільної нижньої частини і пористої верхньої частини (рисунк 3.31). Це підтверджується отриманими фотографіями мікрошліфів (рисунк 3.33).

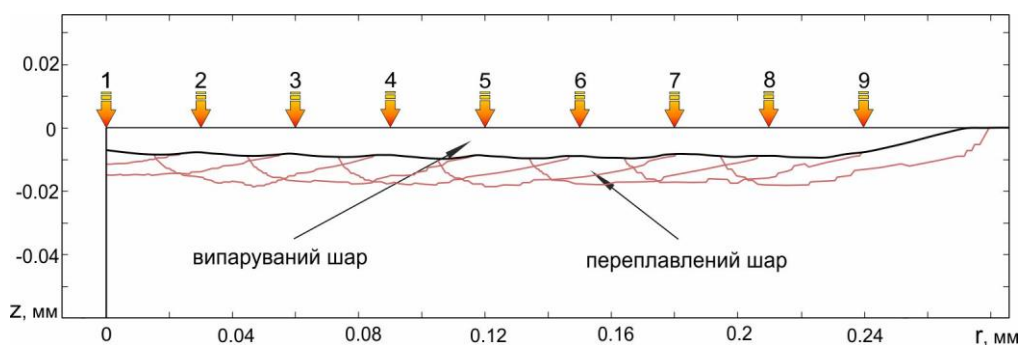


Рисунок 3.32 – Результати моделювання утворення переплавленого шару на поверхні сталі Х12Ф1 внаслідок дії дев'яти послідовних розрядів на режимі 2-3 генератора ГКІ 300-200А

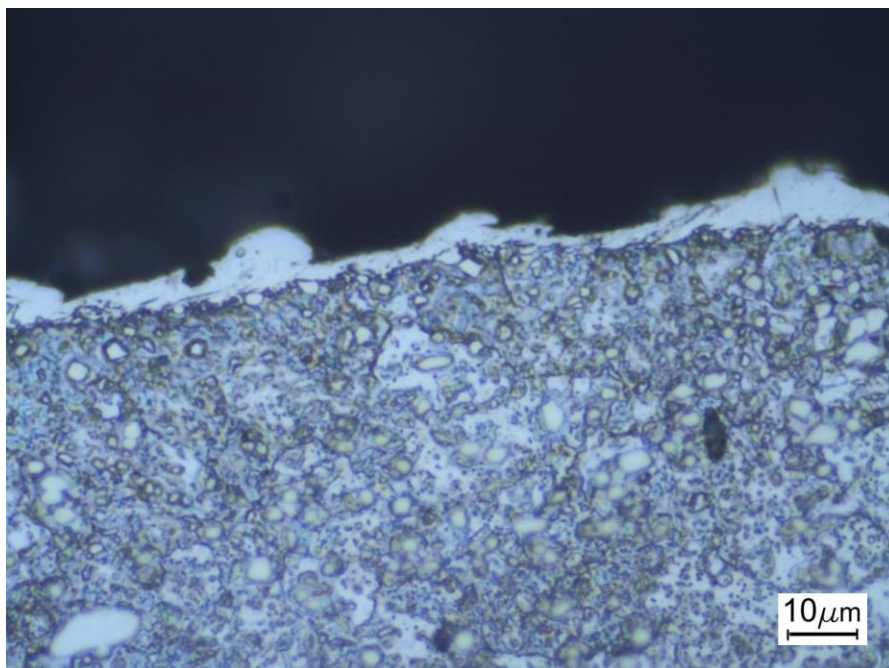


Рисунок 3.33 – Мікрошліф з «білим шаром» на інструментальній сталі Х12Ф1, утвореним після чорнового різку ЕЕВО

Як буде показано в наступних розділах роботи, структурний склад поверхневих шарів вносить свої особливості в їх електрохімічне розчинення при подальшій обробці за комбінованою електроерозійною електрохімічною технологією. Тому важливим є проведення моделювання трансформації аустенітно-мартенситних фаз за результатами розрахованих теплових полів у приповерхневій зоні.

У процесі ЕЕО фазова трансформація складається з двох етапів: перетворення від початкової фази заліза до аустенітової фази протягом дії розряду та перетворення з фази аустеніту в мартенситну фазу під час швидкого охолодження. На рисунку 3.34, *a* зображено утворення аустеніту на першій стадії протягом розряду на прикладі обробки заевтектоїдної сталі Х12Ф1. З підвищенням температури аустенізація починається при температурі A_s і завершується, якщо температура перевищує A_f . Температурно-залежна об'ємна частка аустеніту $f_A(T)$ може бути отримана з модифікованої моделі Міоковича Т. [111], представленій наступним рівнянням:

$$f_A(T) = \begin{cases} 0, & (T \leq A_s); \\ \frac{\varepsilon - \alpha_F \cdot T}{(\alpha_A - \alpha_F) \cdot T + \varepsilon_{tr}}, & (A_s < T < A_f); \\ 1, & (T \geq A_f); \end{cases} \quad (3.15)$$

де коефіцієнти теплового розширення фериту (α_F) та аустеніту (α_A) прийняті як $12,7 \cdot 10^{-6}$ 1/К та $23,3 \cdot 10^{-6}$ 1/К на основі літератури [111]. Загальна деформація ε ($10,29 \cdot 10^{-3}$) та деформація трансформування ферит-аустеніт ε_{tr} ($-0,975 \cdot 10^{-2}$) знаходиться шляхом обрахунку граничних умов у рівнянні (3.15). Стартову температуру аустеніту (A_s) і температуру закінчення (A_f) дуже важко визначити при екстремальних градієнтах температури ($\sim 10^8$ °C/с) за ЕЕО. Передбачається, що температура фазового перетворення зазвичай зміщується до більш високого значення при збільшенні швидкості нагріву, але взаємозв'язок між швидкістю нагріву і температурою фазового перетворення ще не було кількісно визначено. У цьому прикладі дослідження для сталі X12Ф1 значення A_s і A_f вибирались як при рівноважних температурних умовах: $A_s = 810$ °C, $A_f = 860$ °C.

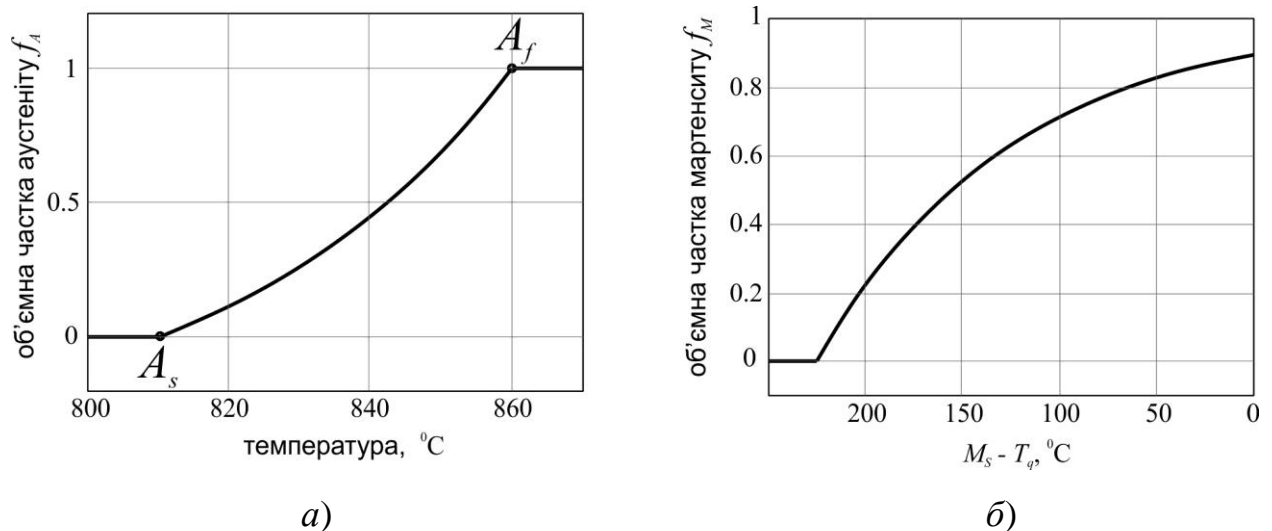


Рисунок 3.34 – Аустенітно-мартенситні фазові перетворення внаслідок дії іскрового розряду за ЕЕО сталі X12Ф1, отримані за рівняннями (3.15), (3.16): а) формування аустеніту протягом дії розряду; б) формування мартенситу протягом швидкого охолодження

На рисунку 3.34, б зображено утворення мартенситу на другій стадії протягом швидкого охолодження. Коли температура опускається нижче температури початку утворення мартенситу (M_s), раніше утворений аустеніт починає перетворюватися на мартенсит через швидке охолодження діелектриком. Об'ємну частку мартенситу (f_M) можна обчислити за рівнянням Койс-тінена та Марбургера [82]:

$$f_M = f_A \cdot \left[1 - e^{-0.01(M_s - T_q)} \right], \quad (3.16)$$

де f_A – об'ємна частка аустеніту, що утворюється при дії розряду, яка обчислюється за рівнянням (3.15), $M_s = 225$ °C – температура початку утворення мартенситу, прийнята, як для рівноважних умов для сталі X12Ф1, T_q – найнижча температура, що досягається загартуванням і відповідає кімнатній температурі 20 °C (рисунок 3.34, б).

Аналіз розташування ізотерм за результатами розрахунків теплової дії іскрових розрядів дає можливість спрогнозувати величину, розташування і фазовий склад зон аустенітно-мартенситних фазових перетворень. Уточнення теоретично отриманих параметрів потребує додаткових експериментальних досліджень.

Для встановлення глибини можливих фазових перетворень проведено моделювання теплової дії на поверхню анода зі сталі X12Ф1 дев'яти послідовних іскрових розрядів, параметри яких відповідають режиму 2-3 генератора ГКІ 300-200А. Тривалість дії кожного розряду становила 5,5 мкс, пауза між імпульсами – 24,5 мкс. Діаметр лунки від дії одиничного розряду становив приблизно 60 мкм, тому відстань між центрами дії сусідніх розрядів прийнята 30 мкм (рисунок 3.35).

У приповерхневій зоні твердотільної моделі анода (рисунок 3.35) встановлено 12 контрольних точок на глибині 10-120 мкм для відстежування зміни температури протягом дії послідовності розрядів.

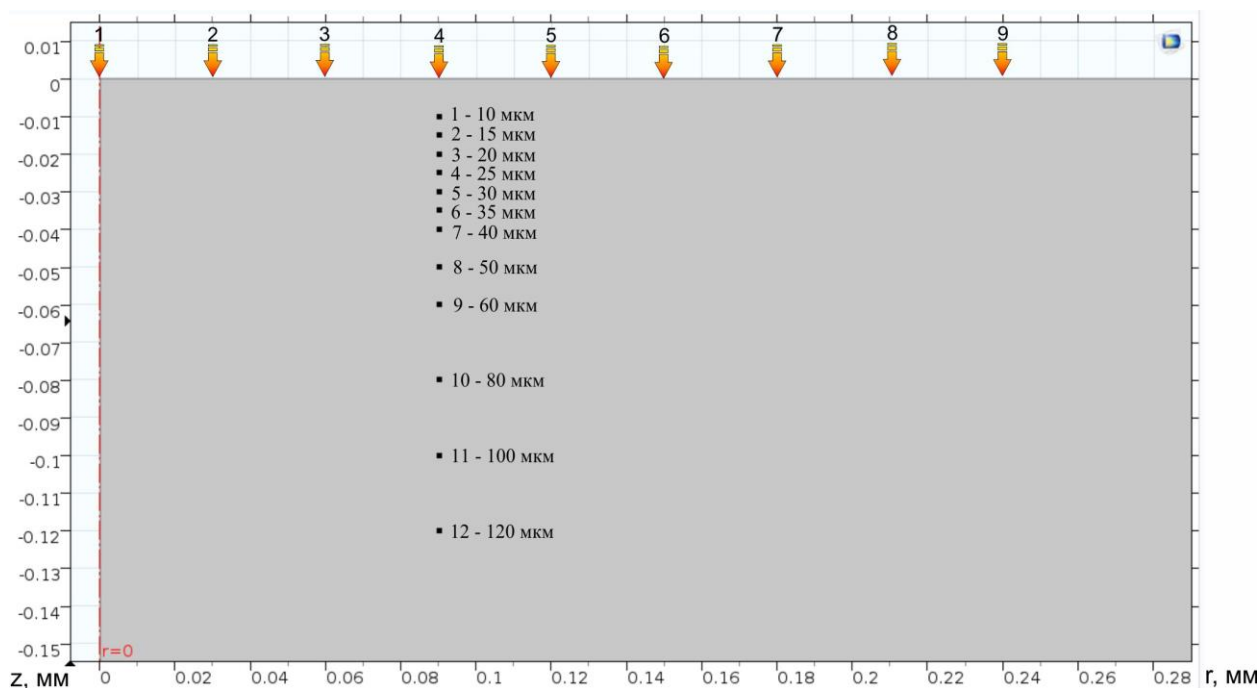


Рисунок 3.35 – Схема розташування 12 точок у приповерхневій зоні анода на глибині 10-120 мкм для контролю зміни температури з часом протягом дії дев'яти послідовних іскрових розрядів

На рисунку 3.36 зображено результати розрахунку динаміки зміни температури в контрольних точках з плином часу. Як видно, найбільший внесок у зростання температури в контрольних точках, розташованих під центром дії четвертого розряду, роблять четвертий (початок дії – з 90 мкс) і п'ятий розряди. Причому дія п'ятого розряду, який розміщений далі, більш відчутна завдяки його дії на вже нагрітий попереднім розрядом матеріал. Це корелює з відомими аномальними тепловими ефектами при кушуванні розрядів.

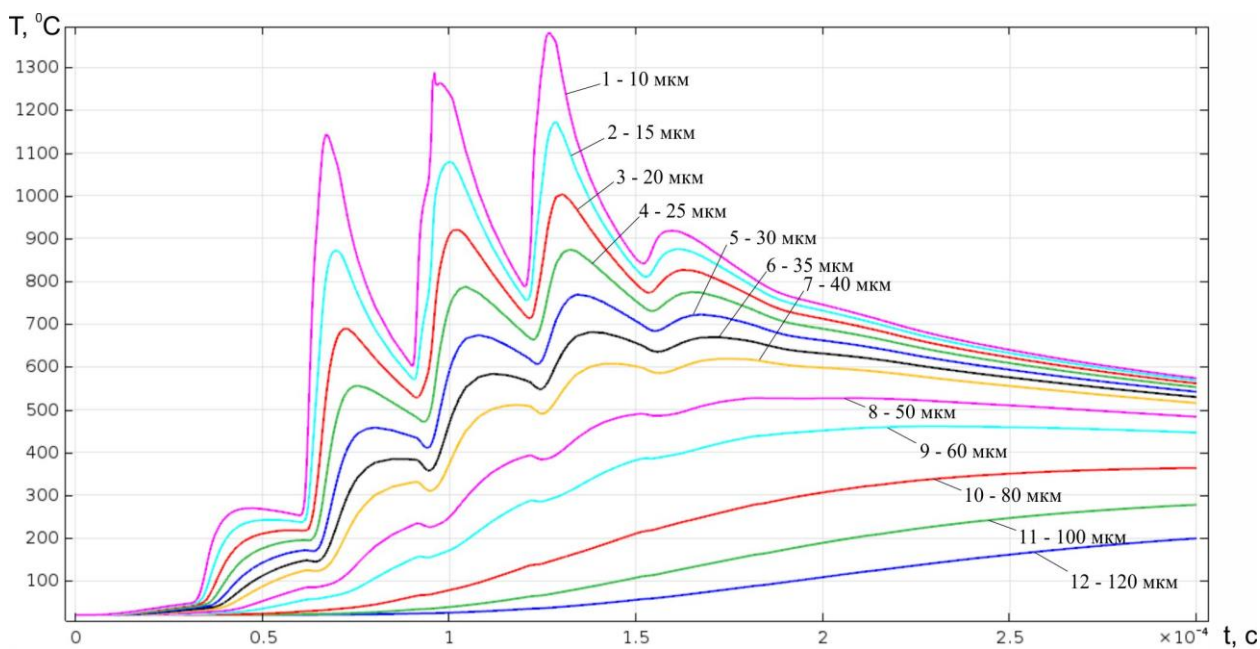


Рисунок 3.36 – Графіки зміни температури з часом у контрольних точках на різних глибинах приповерхневої зони анода зі сталі Х12Ф1 за дії послідовності іскрових розрядів

Температура плавлення евтектики для сталі Х12Ф1 становить 1190-1210 °С. З графіків рисунка 3.36 видно, що в цей діапазон температур потрапляють шари матеріалу на глибині до 10 мкм від обробленої поверхні. Аустенітно-мартенситні фазові перетворення (810-860 °С) слід очікувати на глибині до 25 мкм.

Аналогічно наведеному прикладу проводилися розрахунки параметрів поверхневих шарів на інших режимах ЕЕВО згідно з таблицею 3.1. Результати внесені в поповнювану базу технологічних даних (розділ 6) і використовуються автоматизованою системою проектування технологічних процесів за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дрітним електродом.

3.4 Концепція та методика прогнозування мікрогеометричних параметрів поверхонь при електроерозійному дротяному вирізанні

Мікрогеометричні характеристики поверхні при електроерозійній обробці формуються за рахунок лунок (що взаємно перекриваються), які утворюються в результаті видалення об'єму матеріалу імпульсами струму.

У роботі приймемо наступні припущення:

- всі лунки мають однакову геометричну форму, що може бути описана рівнянням еліпса;
- енергетичні параметри окремих імпульсів незмінні в процесі дії серії імпульсів;
- коефіцієнт перекриття лунок є постійним впродовж усієї обробки і вибирається рівним своєму середньому значенню ($\beta = 1,1$).

Останнє твердження базується на експериментально встановленому факті про високу ймовірність пробоя поблизу краю попередньої лунки, а саме по облямовувальному валику, утвореному внаслідок напливу видаленого металу.

Взявши за основу методику та результати чисельної моделі утворення одиничної лунки для умов ЕЕДВ, проведемо розрахунок дії послідовності імпульсів з подальшим аналізом утвореної поверхні.

Виходячи з фізичних уявлень про процес теплового руйнування матеріалу енергією каналу розряду, можна висунути гіпотезу, що об'єм видаленого матеріалу залишиться незмінним і не залежатиме від вихідної мікрогеометрії поверхні.

В результаті чисельного моделювання серії імпульсів рельєф поверхні можна представити схемою, зображеною на рисунку 3.37.

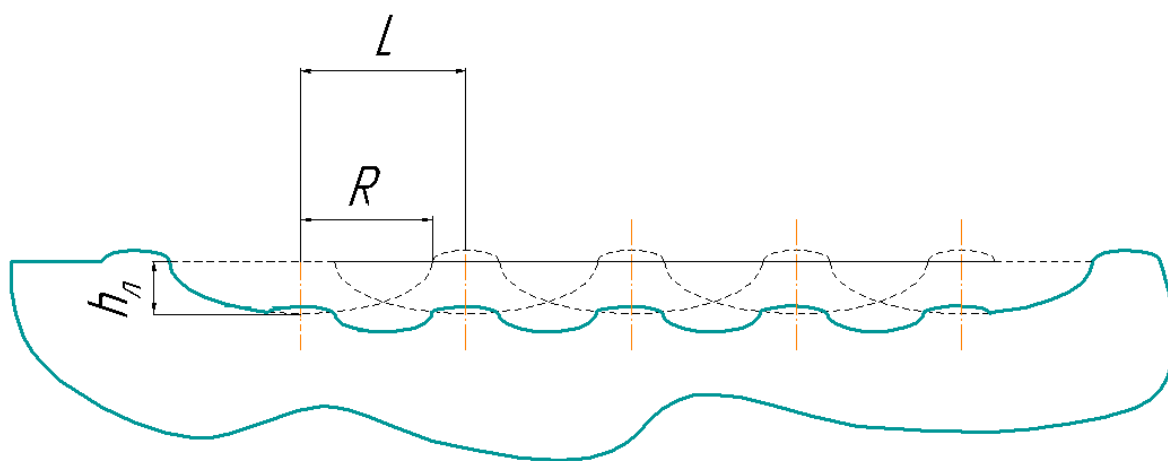


Рисунок 3.37 – Схема формування параметрів шорсткості поверхні

Подальший кількісний розрахунок параметрів R_z , R_p та R_a зводиться до розв'язання суто геометричної задачі, з урахуванням параметрів лунки, отриманих при чисельному моделюванні одиничного іскрового розряду.

З геометричних побудов (рисунок 3.37) та враховуючи, що відношення відстані між центрами сусідніх лунок L до радіуса одиначної лунки R – це коефіцієнт перекриття (3.17), отримаємо схему для розрахунку параметра R_z (рисунок 3.38).

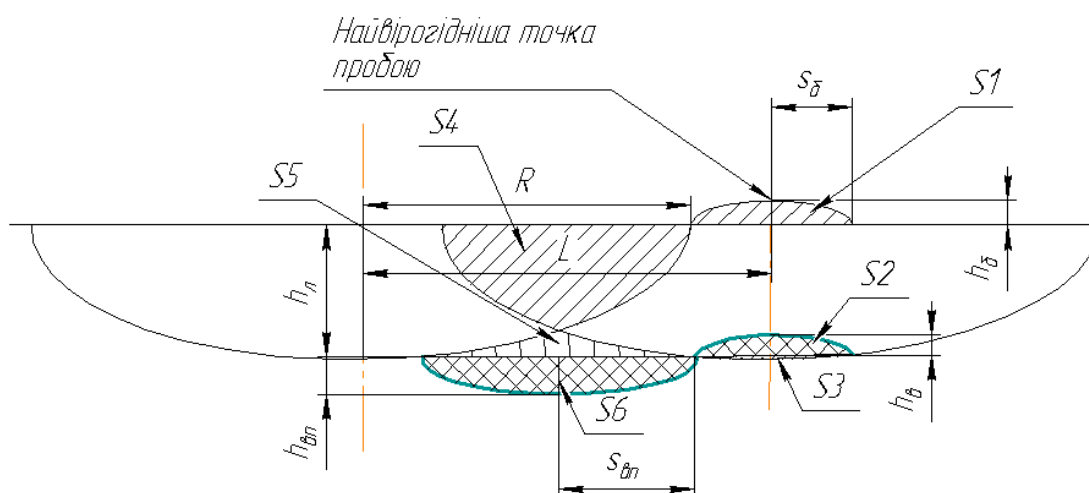


Рисунок 3.38 – Розрахункова схема для визначення параметра шорсткості R_z .

Для проведення розрахунків за цією схемою представимо площі S_2 та S_6 рівняннями (3.18) і (3.19), які дають змогу розрахувати значення параметра R .

$$\beta = \frac{L}{R}, \quad (3.17)$$

$$S_2 = S_1 - S_3, \quad (3.18)$$

$$S_6 = S_4 - S_5, \quad (3.19)$$

де S_1-S_6 – площі областей поперечного перерізу зони обробки, зображеної на рисунку 3.38.

Як було зазначено вище, форма поверхні лунки, з якої було додатково видалено матеріал може бути описана рівнянням еліпса, а центр розряду припадає на вершину облямовувального валика (3.17). Виходячи з цих припущень, напівширина облямовувального валика $s_{\bar{o}}$ та напівширина додатково утвореної поверхні між лунками s_{en} можуть бути описані формулами:

$$s_{\bar{o}} = L - R, \quad (3.20)$$

$$s_{en} = \frac{2 \cdot R - L}{2}. \quad (3.21)$$

Формули для розрахунку зображених на рисунку 3.38 площ мають наступний вигляд:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot h_{\bar{o}} \cdot s_{\bar{o}}}{2}, \quad (3.22)$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot h_{\bar{e}} \cdot s_{\bar{o}}}{2}, \quad (3.23)$$

$$S_3 = (-1) \cdot \int_{-s_{\bar{o}}}^{s_{\bar{o}}} h_{\bar{l}} \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{h_{\bar{l}}^2}{R^2}} - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}} \right) dx, \quad (3.24)$$

$$S_4 = 2 \cdot \int_{\frac{L}{2}}^R h_{\bar{l}} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}} \cdot dx, \quad (3.25)$$

$$S_5 = 2 \cdot \int_{L-R}^{\frac{L}{2}} \left(h_l \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}} \right) \cdot dx \right), \quad (3.26)$$

$$S_6 = \frac{\pi \cdot h_{\text{en}} \cdot s_{\text{en}}}{2}; \quad (3.27)$$

де h_l , h_{en} , $h_{\text{б}}$, $h_{\text{с}}$ – висоти лунки, впадини, буртика та виступу відповідно (рисунки 3.38).

Виконавши перетворення в залежностях (3.18) і (3.19), отримаємо рівняння для розрахунку параметрів $h_{\text{с}}$ та h_{en} :

$$h_{\text{с}} = \frac{2 \cdot (S_1 - S_3)}{\pi \cdot s_{\text{б}}}, \quad (3.28)$$

$$h_{\text{en}} = \frac{2 \cdot (S_4 - S_5)}{\pi \cdot s_{\text{en}}}. \quad (3.29)$$

Далі отримуємо залежність для розрахунку глибини лунки і параметра R_z

$$R_z = h_{\text{с}} + h_{\text{en}}. \quad (3.30)$$

Положення середньої лінії R_p знайдемо з умови рівності площ (рисунки 3.39)

$$S_{\text{с}} + S_{\text{о}} + S_{\text{ч}} = S_{\text{н}}. \quad (3.31)$$

Представимо вирази для знаходження площ у (3.31), використовуючи параметр α . Для спрощення запису рівнянь введемо в розгляд координати по осі абсцис точки A (рисунки 3.39)

$$A = s_{\text{en}} \cdot \sqrt{1 - \frac{((1-\alpha) \cdot R_z)^2}{h_{\text{en}}^2}}. \quad (3.32)$$

Таким чином, рівняння набудуть наступного вигляду:

$$S_{\text{с}} = \frac{\pi \cdot h_{\text{с}} \cdot s_{\text{б}}}{4}, \quad (3.33)$$

$$S_{\text{о}} = (\alpha \cdot R_z - h_{\text{с}}) \cdot r_{\text{б}}, \quad (3.34)$$

$$Ra = \frac{2 \cdot (S_v + S_o + S_q + S_H)}{L}. \quad (3.40)$$

Проведено серію обчислювальних експериментів з моделювання стану обробленої поверхні. Варіювались енергетичні параметри електричних розрядів, частота їх руху, параметри матеріалу деталі. Контролювались товщина термічно зміненого шару, об'єм видаленого матеріалу, форма лунок та проводився розрахунок прогнозованої шорсткості за наведеною в роботі методикою.

3.5 Результати експериментальних досліджень мікрогеометричних параметрів поверхонь при електроерозійному дротяному вирізанні та оцінювання рівня адекватності розробленої методики розрахунку

Експериментально досліджено динаміку зміни мікрогеометричних параметрів поверхні при багатопрхідній ЕЕВО (рисунок 3.40). Встановлено, що зі збільшенням кількості проходів шорсткість Ra знижується. Значно зростає щільність піків, поверхня наближається до платоподібного вигляду, але не стає повноцінно стійкою до зношення.

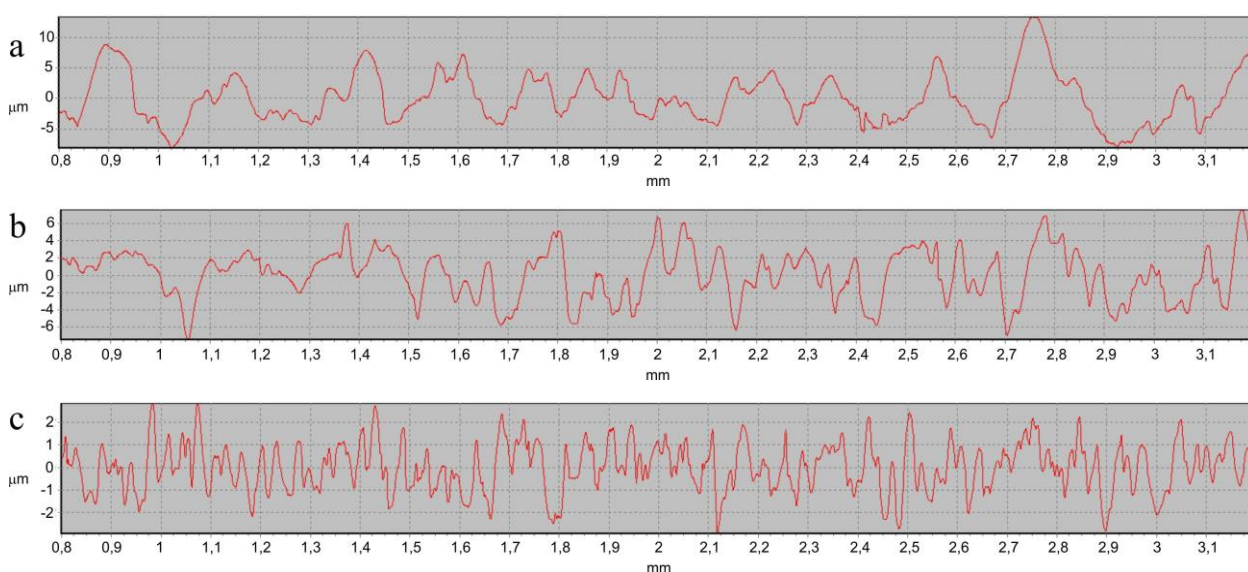


Рисунок 3.40 – Зміна мікрогеометричних параметрів поверхні Сталі 45 при багатопрхідній ЕЕВО: *a* – перший чорновий різ: $Ra = 3,58$ мкм, $Rsk =$

0,52, $R_{pc} = 70,8$ pks/cm; b – три проходи: $Ra = 2,54$ мкм, $Rsk = -0,12$, $R_{pc} = 108,3$ pks/cm; c – п'ять проходів: $Ra = 0,93$ мкм, $Rsk = -0,03$, $R_{pc} = 270,8$ pks/cm

Розбіжність розрахованих параметрів шорсткості Ra і Rz за різних режимів ЕЕВО (таблиця 3.2) з експериментально отриманими становить менше 20 % (таблиця 3.3).

Таблиця 3.2 – Параметри режимів генератора ГКІ 300-200А для багато-прохідної ЕЕВО

Код режиму	Частота, кГц	Тривалість імпульсів, мкс	Амплітуда струму при навантаженні 0,1 Ом, А
2.2	22	$3 \pm 0,3$	180
2.1	22	$3 \pm 0,3$	130
3.4	44	$2 \pm 0,2$	45
5.4	200	$0,9 \pm 0,15$	30
5.2	200	$0,9 \pm 0,15$	24

Таблиця 3.3 – Порівняння параметрів шорсткості поверхні, розрахованих за методикою підрозділу 3.4 та отриманих експериментально за однопрохідної та багатопрохідних ЕЕВО

Вид ЕЕВО (режими)	Розрахунок		Експеримент		Розбіжність, %	
	Ra , мкм	Rz , мкм	Ra , мкм	Rz , мкм	Ra	Rz
Чорновий різ (2.2)	3,25	18,4	3,58	19,3	9	5
Три проходи (2.2, 2.1, 3.4)	2,51	11,1	2,54	13,7	1	19
П'ять проходів (2.2, 2.1, 3.4, 5.4, 5.2)	0,97	4,31	0,93	5,22	4	17

Висновки за розділом 3

1. На основі аналізу відомих результатів експериментальних і теоретичних досліджень сформульовано спрощуючі припущення, які дають можливість виконувати обчислювальні експерименти з використанням тривимірної моделі теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трифазної задачі теплопровідності без суттєвої втрати адекватності математичної моделі реальним фізичним процесам ерозійної руйнації, що відбуваються в зоні дії іскрового розряду.

2. Отримано рівняння, що адекватно описує просторово-енергетичні характеристики джерела тепла в зоні взаємодії плазми каналу іскрового розряду з матеріалом заготовки.

3. Вперше запропоновано експериментально-розрахункову методологію, що ґрунтується на адаптивному узгодженні результатів точних експериментальних досліджень з даними обчислювального експерименту з варійованими вхідними параметрами, є ефективним інструментом наукових досліджень теплових процесів руйнації матеріалу електрода і дає змогу достатньо адекватно оцінювати параметри джерела тепла, сформованого одиничним іскровим розрядом.

4. З використанням запропонованої експериментально-розрахункової методології вперше отримано рівняння, що адекватно описують процес розширення короткого іскрового розряду в середовищі водопровідної води з електропровідністю та водному розчині АмПАР з концентрацією 0,05 %.

5. Проведено серію обчислювальних експериментів з використанням тривимірної моделі теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трифазної задачі теплопровідності і встановлено, що для обраного діапазону параметрів одиничного іскрового розряду сучасних генераторів струму електроерозійних вирізних верстатів найбільший вплив на об'єми як випаруваної, так і рідкої фази матеріалу анода (Сталь 45) мають просторово-енергетичні характеристики каналу розряду, тобто площа

дії плоского висококонцентрованого джерела тепла та загальна енергія, що виділилася на електроді (E_a). При цьому площа дії плоского джерела тепла є фактично домінуючою.

6. Спираючись на результати експериментальних досліджень та обчислювальних експериментів, встановлено кількісні кореляційні зв'язки між амплітудно-частотними характеристиками електричних імпульсів та параметрами теплових полів і, відповідно, глибиною зони структурних змін у поверхневих шарах обробленої поверхні.

7. Запропоновано та обґрунтовано методику визначення параметрів шорсткості поверхонь, сформованих послідовністю дії розрядів, характерних для електроерозійного дротяного вирізання.

8. Спираючись на запропоновану схему та зроблені обґрунтовані припущення, вперше отримано рівняння для прогнозування параметрів шорсткості поверхонь у технологічних процесах ЕЕДВ з використанням методології розрахунку геометрії одиничної ерозійної лунки за тривимірною моделлю теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трифазної задачі теплопровідності.

9. Розрахунки параметрів шорсткості сталевих деталей за отриманими рівняннями та розрахованими геометричними характеристиками одиничної ерозійної лунки (V_l , d_l , h_l) дають задовільний збіг з експериментально отриманими профілограмами.

РОЗДІЛ 4

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПРИПОВЕРХНЕВОГО АНОДНОГО РОЗЧИНЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНІЙ ОБРОБЦІ МІКРОСЕКУНДНИМИ ІМПУЛЬСАМИ СТРУМУ

Реалізація ефективного технологічного процесу ЕХРО рухомим дротяним електродом-інструментом за технологічної схеми ЕЕДВ на сьогодні є піонерською та достатньо складною в науково-технічному плані проблемою. Її вирішення вимагає комплексу експериментальних і теоретичних досліджень, математичного та фізичного моделювання основних процесів, що визначають характер електрохімічного розчинення отриманої електроерозійним методом поверхні деталі-анода при використанні як катода ДЕІ.

Окрім класичного ЕХО-процесу з використанням постійного струму, інноваційними на сьогодні є розроблені варіанти технологічного процесу ЕХО на основі імпульсного струму. Застосування імпульсного електричного джерела дає можливість відновлення електроліту протягом релаксаційного інтервалу часу між робочими імпульсами. Тим самим реалізується більш висока густина струму, що, в свою чергу, приводить до підвищення точності та зниження шорсткості поверхні [77].

Застосування імпульсної ЕХО завдяки дозованому вводу енергії в МЕП шляхом вибору амплітудно-часових параметрів струму дає змогу значно підвищити керованість процесу, але разом з тим з'являються проблеми визначення і контролю інших технологічних чинників, що мають обмежувачий вплив на «засвоєння» підведеної енергії.

У цьому розділі вирішуються задачі встановлення закономірностей процесів приповерхневого анодного розчинення за взаємного впливу основних технологічних параметрів процесу, включно з характеристиками матеріалу заготовки, отриманими внаслідок попередньої термообробки, які найчастіше застосовуються при ЕЕВО.

Далі вирішується комплекс задач по розробці методів для створення ефективних технологічних схем ЕХРО з урахуванням встановлених закономірностей і особливостей процесів електрохімічної обробки дротяним електродом-інструментом у складі комбінованої технології електроерозійної електрохімічної обробки.

4.1 Експериментальні та теоретичні дослідження впливу гідродинаміки потоку електроліту на процеси анодного розчинення

У процесах ЕХО режим потоку електроліту має великий вплив на стабільність та ефективність процесу. Чим складніша конфігурація деталі, що виготовляється, тим більшою проблемою є забезпечення рівномірного потоку електроліту вздовж поверхні анода. Так, за розробки технологічної схеми виготовлення криволінійних лопаток дифузора методом ЕХО було запропоновано кілька нових режимів потоку, таких як режим W-форми, П-подібний режим і динамічний додатковий потік електроліту [207]. Застосовуються різні інноваційні заходи, такі як прогресуючий тиск [140], пульсуючий електроліт [139]. При цьому проводяться моделювання і аналіз характерних параметрів полів потоку в міжелектродному проміжку. Дослідження проводяться із застосуванням двовимірних моделей потоку електроліту [19], а також більш сучасних тривимірних мультифізичних моделей [39, 80, 173, 183]. На завершення проводяться експерименти для перевірки ефективності потокового режиму [206]. Зазначені вище дослідження показують, що відповідний режим потоку та рівномірний розподіл поля потоку є дуже важливими при ЕХО.

Для підвищення точності ЕХО необхідне застосування невеликих значень міжелектродних проміжків. За таких умов враховуються не лише параметри поля потоку електроліту, а й параметри електричного поля [129]. Метою досліджень є отримання зв'язків між потоком, струмом і величиною проміжку, що забезпечують основу для обґрунтованого вибору параметрів при проектуванні технологічних процесів ЕХРО.

4.1.1 Результати експериментальних досліджень діапазону швидкостей потоку електроліту у взаємозв'язку з амплітудно-часовими параметрами електричних імпульсів при використанні електрохімічної комірки з відцентровою подачею електроліту

Експерименти по дослідженню процесів електрохімічного розчинення з використанням комірки з радіальним відцентровим потоком електроліту (пункт 2.1.6) давали можливість за один експеримент отримати кілька ділянок поверхні анода, оброблених в умовах з різними швидкостями потоку електроліту за інших рівних параметрів ЕХО (рисунок 4.1). Завдяки зростанню площі живого перетину за рухом електроліту від центру до периферії комірки швидкість зменшувалася. Регулюванням тиску подачі електроліту на вході комірки та вибором величини МЕРП досягався необхідний діапазон варіації швидкості потоку для кожного експерименту.

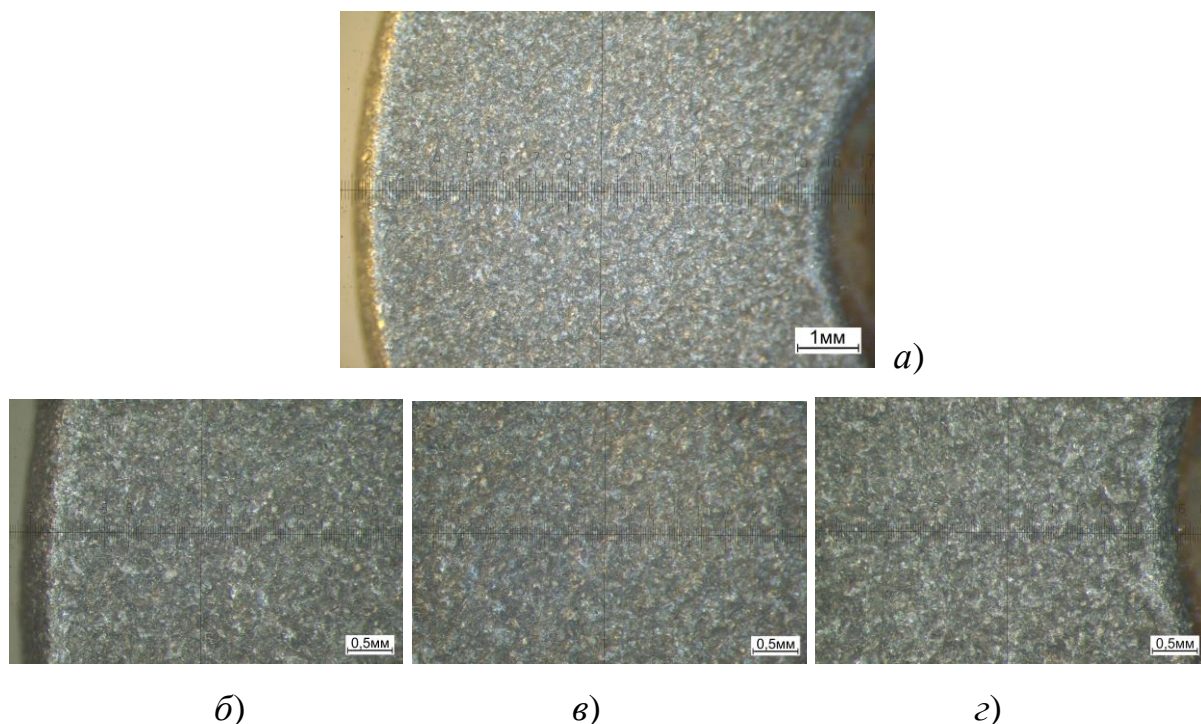


Рисунок 4.1 – Поверхня анода (Сталь 45) після ЕХО в електрохімічній комірці з радіальним відцентровим потоком: а) сектор кругового кільця поверхні анода; б) периферійна ділянка анода, оброблена з найменшою швидкістю потоку електроліту; в) серединна ділянка поверхні анода; г) ділянка ано-

да, найближча до центру і, відповідно, оброблена в умовах з найвищою швидкістю потоку електроліту

Значення швидкостей потоку електроліту в електрохімічній комірці для кожного експерименту визначалися за результатами чисельного розрахунку поля швидкостей з використанням математичного пакета Solid Works Flow Simulation (рисунок 4.2), який здійснює обчислення на основі методу скінченних елементів (МСЕ).

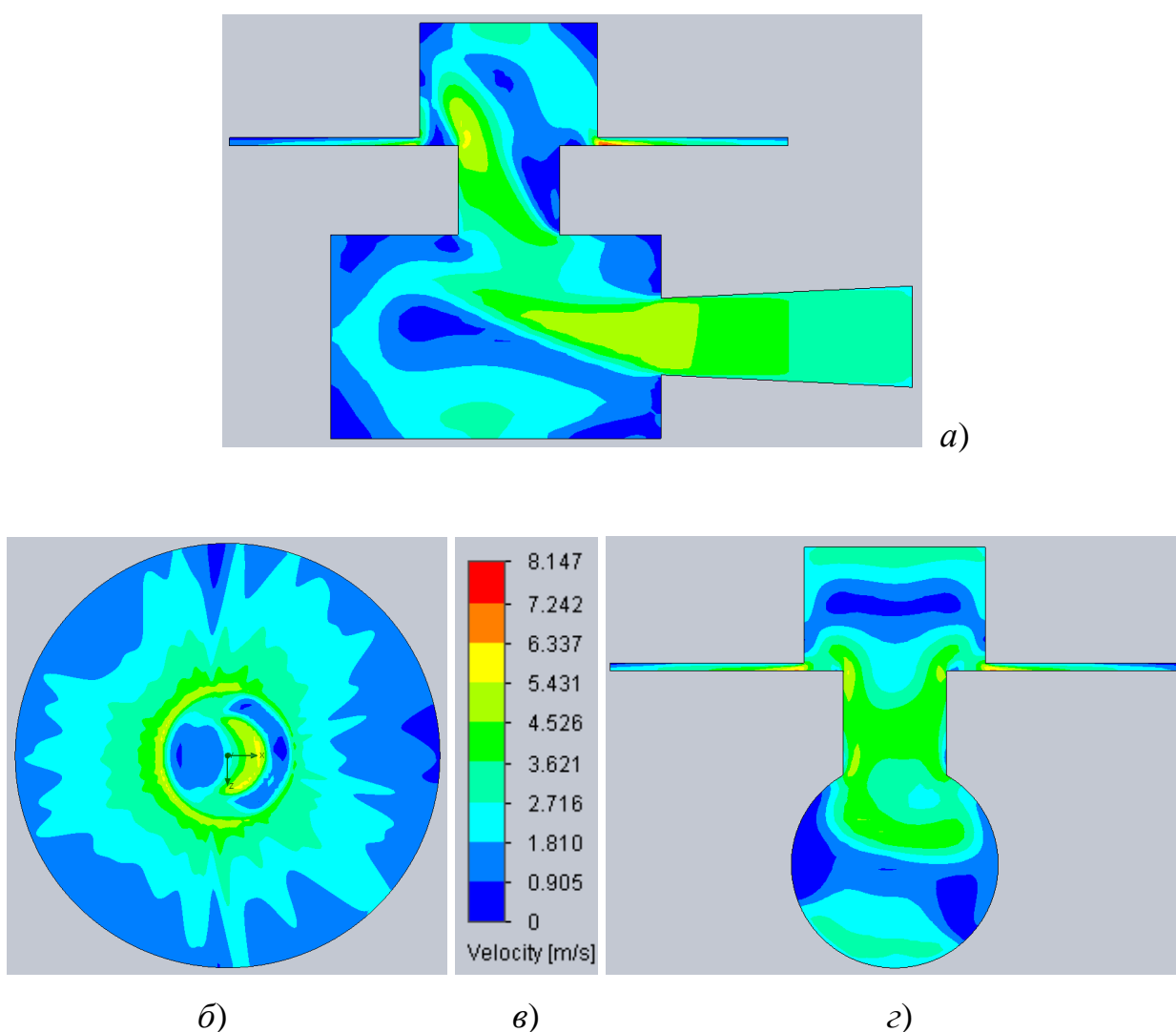


Рисунок 4.2 – Поле швидкостей електроліту в електрохімічній комірці з радіальним відцентровим потоком (електроліт – 1 М NaCl, тиск на вході – 0,141 МПа, МЕР – 0,3 мм): а), з) у вертикальних перерізах; б) у горизонталь-

ному перерізі в МЕП на відстані 0,1 мм від поверхні анода; в) шкала швидкостей електроліту

Сектор потоку над анодом було умовно поділено на три ділянки (рисунок 4.3). Використовувалось усереднене значення швидкості електроліту над кожною з них.

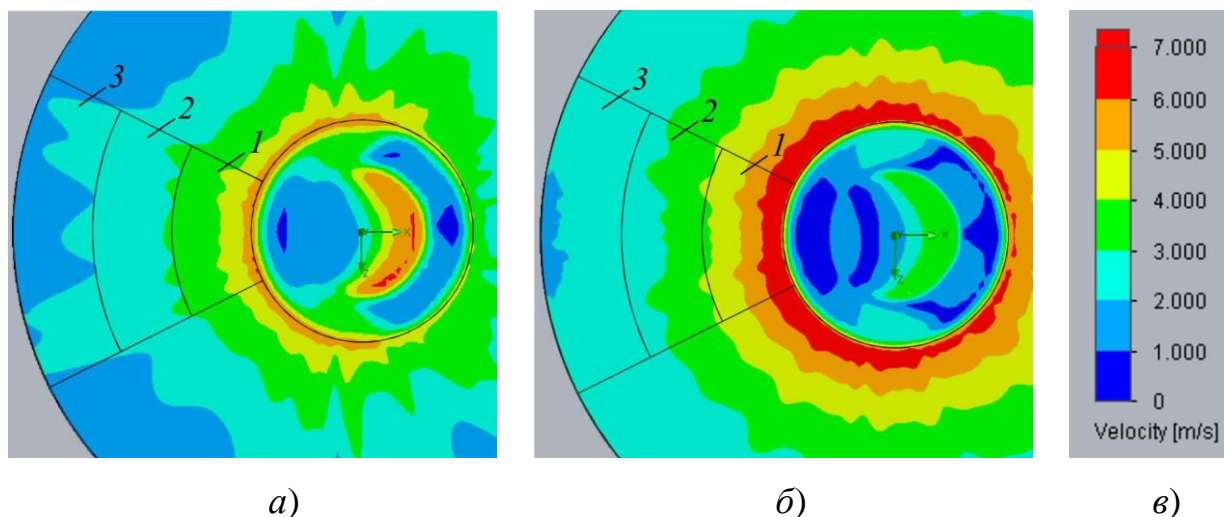


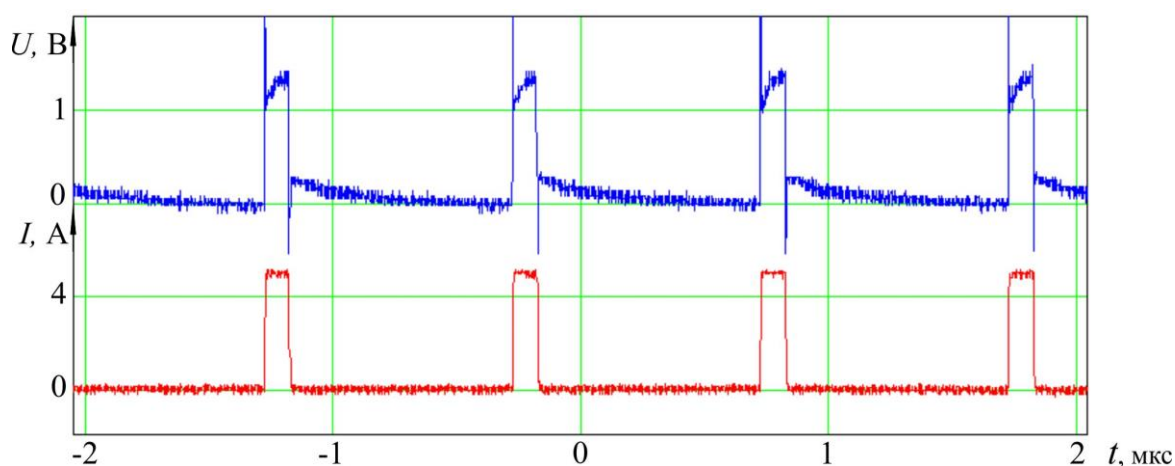
Рисунок 4.3 – Розподіл швидкостей електроліту над секторними ділянками анода (1, 2, 3): а) МЕП – 0,3 мм, тиск на вході в комірку – 0,148 МПа; б) МЕП – 0,15 мм, тиск – 0,145 МПа; в) шкала швидкостей

У ході проведення кожного експерименту знімалися осцилограми напруги та струму на МЕП (рисунок 4.4). Електричну схему підключення та методику отримання осцилограм описано в пункті 2.2.2.

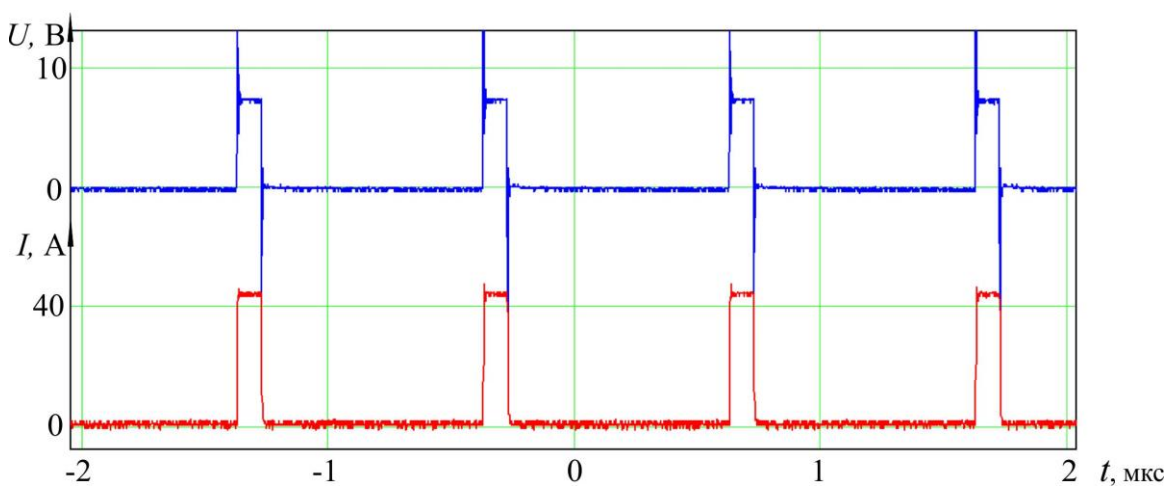
За осцилограмами чітко простежувався стан МЕП і характер перебігу електрохімічних процесів. Так, за гальваностатичного режиму джерело живлення підтримує задану прямокутну форму імпульсів струму. Форма сигналу напруги залежить від електричного опору МЕП, який, в свою чергу, визначається провідністю електроліту та проходженням процесів анодного розчинення.

На рисунку 4.4, а зображено осцилограму, яка ілюструє небажані процеси в МЕП. Спостерігається збільшення опору МЕП протягом робочого ім-

пульсу струму і наявність залишкової поляризації після його вимкнення. Це може свідчити про утворення окисних плівок на поверхні анода, виснаження дифузійного шару тощо. Як правило, за таких умов отримується неякісна поверхня анода з нерівномірним розчиненням. Оцінювання стану поверхні проводилося візуальним способом з використанням оптичних приладів. За методикою пункту 2.2.2 обчислювалися значення електричних параметрів МЕР і з'ясовувалися кореляційні зв'язки з якістю отриманої поверхні. Встановлено, що найбільш якісна поверхня анода досягається за умов набуття сигналом напруги форми, близької до прямокутної (рисунк 4.4, б). Очевидно, що в такому випадку параметри МЕР залишаються в рамках заданих величин, і електрохімічне розчинення відбувається контрольовано і стабільно.



а)



б)

Рисунок 4.4 – Осцилограми струму (червона лінія) та напруги (синя лінія) на МЕП: *а)* зі зміною стану МЕП, *б)* зі стабільними параметрами електрохімічного розчинення

Негативний процес накопичення залишкової поляризації на електродах ілюструють осцилограми на рисунку 4.5. Перша осцилограма сигналу струму (червона лінія) і відповідного йому сигналу напруги (синя лінія) зняті на початку експерименту. Спостерігається прямокутна форма сигналу напруги. Однак осцилограма сигналів, знята наприкінці загального часу процесу електрохімічного розчинення, показує зміну форми сигналу напруги (коричнева крива), що свідчить про погіршення стану МЕП. Це означає, що вибрана комбінація параметрів – величина проміжку, швидкість електролізу, амплітудно-часові характеристики імпульсів струму – є нестійкою, і для отримання прийнятної якості поверхні час обробки слід скорочувати.

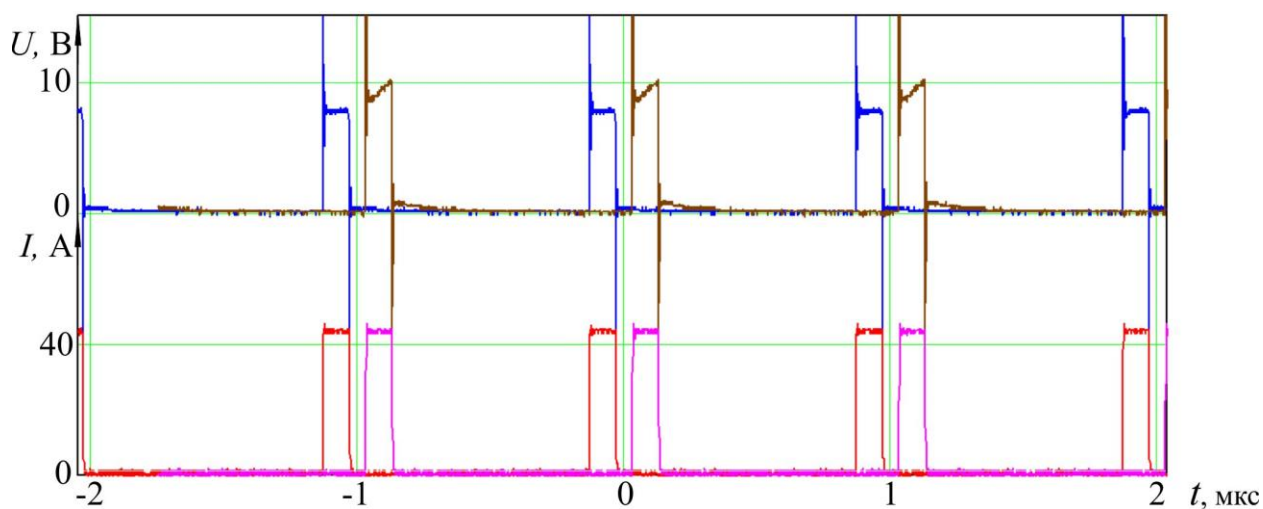


Рисунок 4.5 – Осцилограми струму (внизу) та напруги (зверху) на МЕП у різні моменти часу електрохімічного розчинення

Основні результати та умови серії експериментів з використанням комірки з радіальним відцентровим потоком електролізу наведено в таблиці 4.1. Використовувався анод зовнішнім діаметром 22 мм, центральний отвір подачі електролізу діаметром 7 мм. Матеріал анода – Сталь 45. Як електроліт

застосовувалися водні розчини NaCl з концентрацією 1 М та 2 М, які за температури 26-31 °С мали питому провідність 0,09 і 0,16 1/(Ом·см), відповідно.

Геометричні розміри електродів підібрані таким чином, що відносно значень МЕР отримані електричні поля мали рівномірний характер, і розрахунок товщини знятого шару проводився за аналітичними формулами на основі одномірної математичної моделі з урахуванням зміщення границі анода для умов ідеального (коефіцієнт виходу за струмом $\eta = 1$) процесу електрохімічного розчинення [215]:

$$\Delta h = \sqrt{h_0^2 + 2K_v \cdot \kappa \cdot U \cdot \frac{t}{S}} - h_0, \quad (4.1)$$

де Δh – товщина розчиненого шару; h_0 – початкове значення МЕР; K_v – об'ємний коефіцієнт електрохімічного розчинення матеріалу анода; κ – питома провідність електроліту, U – напруга на електродах, S – шпаруватість імпульсного струму, t – загальний час електрохімічного розчинення.

Стан поверхні на кожній ділянці фотографувався з використанням оптичних приладів і оцінювався візуально в порівнянні.

Для розрахунку відношення застосованої в експерименті густини струму i до гранично допустимої густини струму i_{PL} , яка, в свою чергу, визначається за формулою (2.83) пункту 2.3.6, обраховувалась товщина дифузійного шару δ для кожної ділянки за формулами, що найбільше відповідають гідродинамічним умовам потоку електроліту, створеним у цих експериментах [22, 114]:

$$\delta = \frac{d_h}{Nu}, \quad (4.2)$$

$$Nu = 1,85 \cdot \left(Re \cdot Sc \cdot \frac{d_h}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4.3)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D}, \quad (4.4)$$

$$Re = \frac{v \cdot d_h}{\nu}, \quad (4.5)$$

де d_h – еквівалентний діаметр живого перетину каналу потоку електроліту; Nu – число Нусельта; Sc – число Шмідта; Re – число Рейнольдса; L – відстань від початкової точки дотику потоку електроліту з анодом до точки на аноді, де розраховується товщина дифузійного шару; ν – кінематична в'язкість електроліту; D – коефіцієнт молекулярної дифузії акцепторних іонів у нескінченно розбавленому водному розчині; v – швидкість електроліту в точці розрахунку.

Таблиця 4.1 – Умови і результати експериментів по анодному розчиненню в електрохімічній комірці з радіальним відцентровим потоком

№ експерименту	Амплітуда струму в імпульсі I_{oc} , А	Густина струму i , А/см ²	Амплітуда напруги U_{oc} , V	Провідність електроліту, 1/(Ом·см)	Тиск електроліту, МПа	Величина МЕР, мкм	Період імпульсів, мс	Шпаруватість	Загальний час ЕХО, с	$I \cdot t$ (кількість електрики), А·с	Товщина знятого шару (теор.), мкм	Стан поверхні, ділянка 1	Стан поверхні, ділянка 2	Стан поверхні, ділянка 3	Швидкість електроліту, ділянка 1, м/с	Швидкість електроліту, ділянка 2, м/с	Швидкість електроліту, ділянка 3, м/с	Товщина дифузійного шару δ_1 , мкм	Товщина дифузійного шару δ_2 , мкм	Товщина дифузійного шару δ_3 , мкм	i/i_{PL} , ділянка 1	i/i_{PL} , ділянка 2	i/i_{PL} , ділянка 3
PS1E1_1	5	1,5	1,6	0,09	0,148	300	1	5	100	100	9	+/-	-/+	-	3,6	2,6	2,0	4,3	6,5	8,3	0,12	0,14	0,2
PS1E1_2	10	2,9	2,7	0,09	0,148	300	1	5	120	240	21	-/+	-/+	+	3,6	2,6	2,0	4,3	6,5	8,3	0,21	0,28	0,3
PS1E1_3	20,8	6,1	4,4	0,09	0,148	300	1	5	120	499	43	-/+	-/+	+	3,6	2,6	2,0	4,3	6,5	8,3	0,45	0,58	0,7
PS1E1_4	31	9,1	6,6	0,09	0,148	300	1	5	120	744	64	-/+	-/+	-	3,6	2,6	2,0	4,3	6,5	8,3	0,66	0,87	1
PS1E1_5	36	10,5	7,6	0,09	0,148	300	1	5	120	864	74	+/-	-/+	-	3,6	2,6	2,0	4,3	6,5	8,3	0,77	1,01	1,2
PS1E1_7	35	10,2	6,8	0,09	0,148	200	1	5	120	840	72	+/-	+	+/-	4,6	2,9	2,1	3,5	5,5	7,1	0,67	0,88	1
PS1E1_6	45	13,2	10	0,09		300	1	5	120	1080	93	-/+	-	-	3,6	2,6	2,0	4,3	6,5	8,3	0,96	1,26	1,5
PS1E2_1	5	1,5	1,4	0,09	0,145	300	1	10	200	100	9	-	-	-	3,4	2,6	1,9	4,3	6,5	8,5	0,07	0,08	0,1
PS1E2_4	5,2	1,5	3,6	0,09	0,145	150	1	10	200	104	9	-	-/+	-	4,7	3,0	2,2	3,1	4,9	6,4	0,06	0,07	0,1
PS1E2_5	5,4	1,6	3,5	0,09	0,145	100	1	10	200	108	9	-	-	-/+	3,8	2,6	1,9	2,9	4,5	5,9	0,06	0,07	0,1
PS1E2_2	44	12,9	9	0,09	0,145	150	1	10	240	1056	91	+/-	+/-	+	4,7	3,0	2,2	3,1	4,9	6,4	0,5	0,62	0,7
PS1E2_3	44	12,9	7,6	0,09	0,145	100	1	10	180	792	68	+/-	+	+	3,8	2,6	1,9	2,9	4,5	5,9	0,49	0,6	0,7
PS1E3_1	43,2	12,6	7,8	0,16	0,143	150	1	10	100	432	37	-	+/-	+/-	4,5	2,9	2,1	3,2	5,0	6,5	0,25	0,31	0,4
PS1E3_2	44	12,9	6,8	0,16	0,143	100	1	10	100	440	38	-	-/+	-/+	3,7	2,5	1,8	3,0	4,6	6,0	0,25	0,3	0,4
PS1E3_3	44	12,9	6,2	0,16	0,143	100	1	20	100	220	19	-/+	-/+	-/+	3,7	2,5	1,8	3,0	4,6	6,0	0,16	0,19	0,2

Найбільш якісний стан поверхні отримано за параметрів, виділених кольором у таблиці 4.1. У цих випадках осцилограми струм–напруга мали вигляд, подібний до рисунка 4.4, б, тобто спостерігалось стабільне проходження електрохімічного розчинення. Найбільш прийнятний швидкісний діапазон електроліту становить 2-3 м/с за величини МЕП 100-200 мкм. Підтверджується відомий з літератури факт, що більш якісна поверхня отримується при застосуванні вищих значень густини струму. Отримані результати дослідів дають можливість уточнити цей принцип. Саме по собі збільшення густини струму за імпульсної ЕХО не веде до покращення отриманої поверхні. Це підтверджує результат дослідів PS1E1_6, в якому застосування високого значення густини струму з невеликою шпаруватістю призвело до перевищення гранично допустимих значень густини імпульсного струму i_{PL} в середньому в 1,3 рази. Протягом дослідів спостерігався буро-зелений колір електроліту на виході з комірки, що свідчить про проходження сторонніх небажаних хімічних реакцій. В результаті отримано незадовільну якість поверхні.

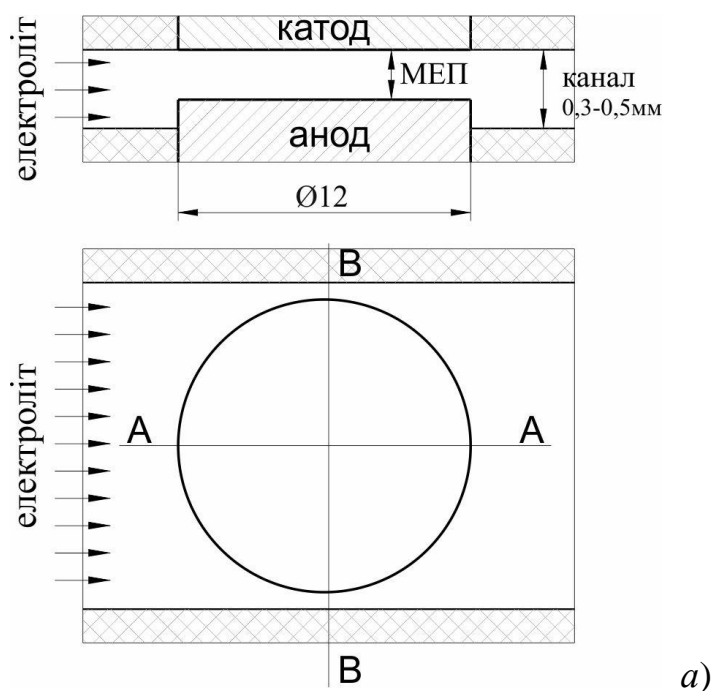
Результати вдалих експериментів показали, що найбільш прийнятне співвідношення густини струму до гранично допустимої (i/i_{PL}) становить 0,7-0,8, хоча в теорії це співвідношення має бути близьким до 1. Зниження значень цього коефіцієнта теж веде до погіршення якості вихідної поверхні. Збільшення концентрації електроліту до 2 М (питома провідність 0,16 1/(Ом·см)) в серії експериментів PS1E3 не привело до бажаного результату покращення поверхні. Справа в тому, що вище значення питомої провідності електроліту за розрахунковими формулами збільшує значення i_{PL} , і в зазначеній серії дослідів мало місце знижене значення співвідношення i/i_{PL} . Застосувати більшу густину струму i не вдалося в зв'язку з обмежувачими характеристиками джерела струму і порівняно великою площею електродів у цій конструкції електрохімічної комірки.

Для уточнення кореляційних зв'язків гідродинамічних та електричних параметрів при застосуванні імпульсної ЕХО було використано електрохімі-

чну комірку з плоскопаралельною, рівномірною по швидкості подачею електроліту.

4.1.2 Обґрунтування вибору амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів за експериментами з плоскопаралельним потоком електроліту

Експериментальні дослідження виконувалися з використанням електрохімічної комірки з плоскопаралельним потоком електроліту (пункт 2.1.6). На рисунку 4.6, *а* зображено схему зони реактора електрохімічної комірки. Експерименти проводилися за значень висоти каналу 0,3 мм та 0,5 мм і з варіюванням величини МЕР. Звичайно, зміна цих параметрів вносила корективи в гідродинамічний стан потоку електроліту. Контроль розподілу поля швидкостей електроліту здійснювався шляхом чисельного розрахунку в середовищі математичного пакета Solid WORKS Flow Simulation за методом скінченних елементів (рисунк 4.6, *б*).



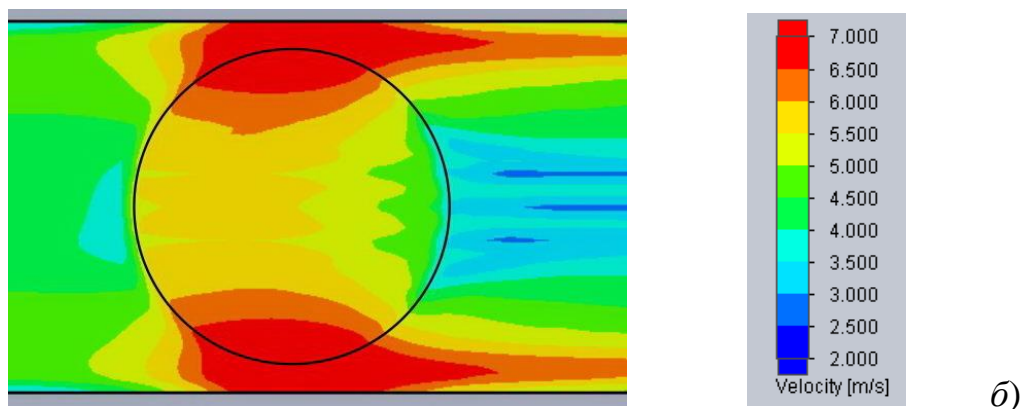
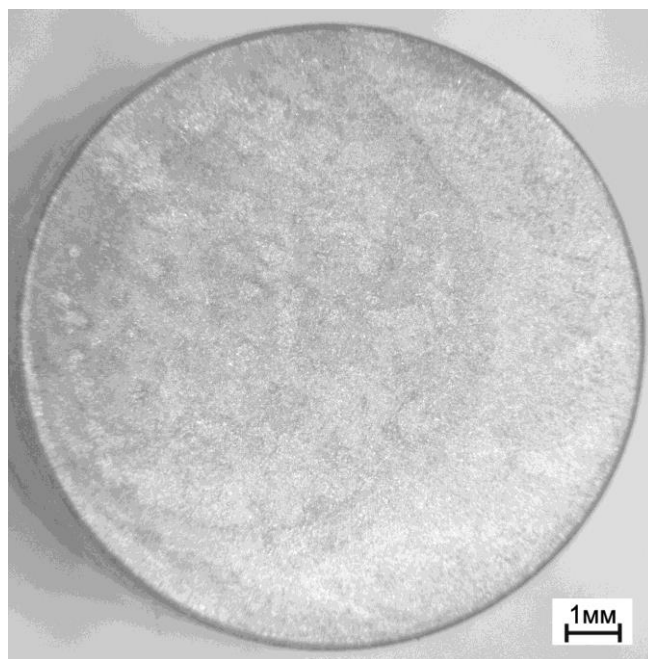
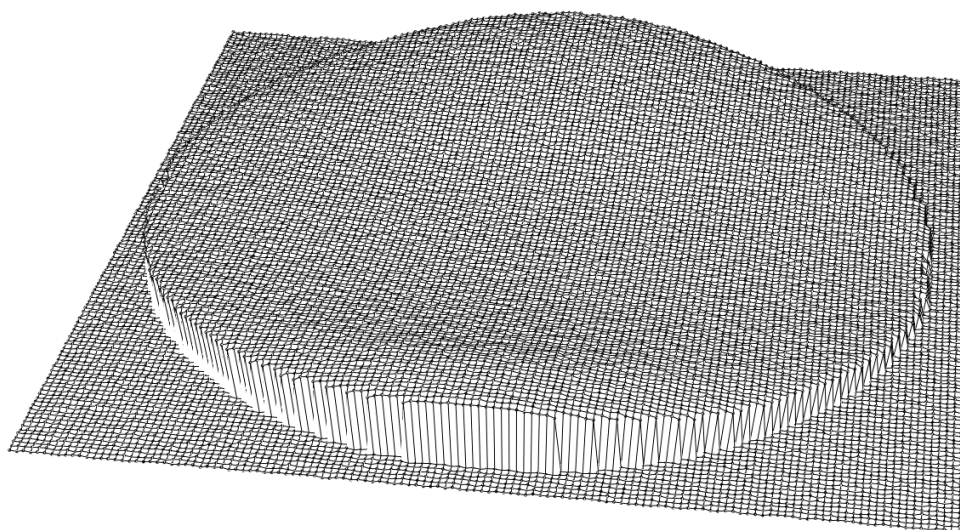


Рисунок 4.6 – Схема зони реактора електрохімічної комірки з плоско-паралельною подачею електроліту (*а*) та поля швидкостей електроліту в характерних перерізах (*б*)

Приклад результату формоутворення поверхні внаслідок електрохімічного розчинення, що якісно ілюструє взаємний вплив гідродинамічних параметрів потоку електроліту та амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів, зображено на рисунку 4.7. За розподілу швидкостей потоку, зображеного на рисунку 4.6, *б*, шляхом вибору амплітудно-часових параметрів імпульсного струму в МЕП введено високий рівень електричної енергії та створено умови прикритичних значень $i_{\text{lim}} \approx i_{\text{PL}}$ (див. мат. модель пункту 2.3.6) для швидкості електроліту в центрі анода, приблизно 5-5,5 м/с. В місцях поверхні анода, де швидкість набувала вищих значень, внаслідок зміни товщини дифузійного шару отримано перевищення допустимої густини струму імпульсного режиму. В результаті спостерігається зменшення інтенсивності розчинення в цих місцях (рисунку 4.7, *б*). Найкраща якість поверхні (рисунку 4.7, *а*) спостерігається в місцях поверхні анода, де швидкість електроліту не перевищувала 5 м/с.



a)



б)

Рисунок 4.7 – Циліндричний зразок діаметром 12 мм (Сталь 45) після ЕХРО у вищезазначених умовах потоку електроліту (напря́м потоку злі́ва напра́во) за прикритичних значень i_{lim} : фото поверхні (а), форма поверхні (б) (масштабний коефіцієнт по координаті z збільшено для кращої візуалізації)

При плануванні експериментів та вимірюванні шорсткості поверхні в різних місцях обробленої поверхні анода брались до уваги уточнені розраховані значення швидкостей електроліту в МЕП. На рисунках 4.8, 4.9 зображено графіки швидкостей вздовж лінії над анодом у площині перерізу А-А (ри-

сунок 4.6). По горизонтальній осі графіків відкладено відстань від точки початку контакту потоку з поверхнею анода ($L = 0$) до кінцевої точки контакту потоку з анодом ($L = 12$).

Графіки на рисунку 4.8 отримано для висоти каналу 0,5 мм за тиску на вході в комірку 0,156-0,159 МПа. Крива 1 відповідає величині МЕР 100 мкм, 2 – 150 мкм, 3 – 200 мкм, 4 – 300 мкм.

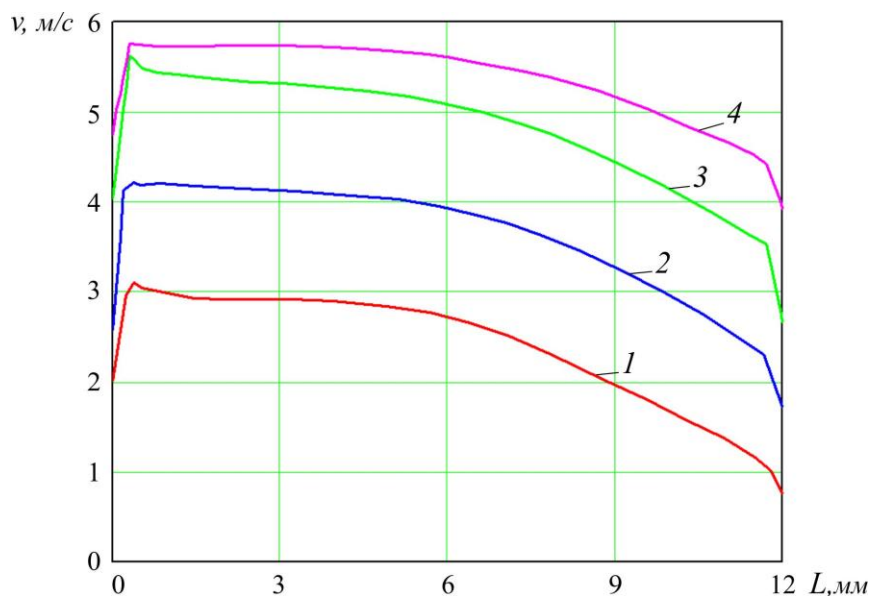


Рисунок 4.8 – Розподіл швидкості електроліту вздовж лінії в напрямку потоку посередині анода за висоти каналу 0,5 мм для різних значень МЕР (пояснення в тексті)

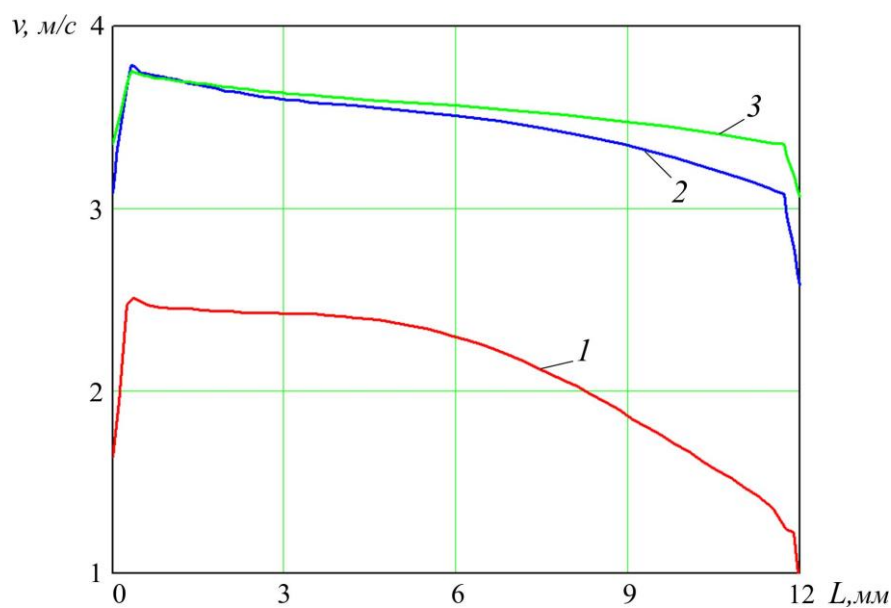


Рисунок 4.9 – Розподіл швидкості електроліту вздовж лінії в напрямку потоку посередині анода за висоти каналу 0,3 мм для різних значень МЕР (пояснення в тексті)

Графіки на рисунку 4.9 отримані для висоти каналу 0,3 мм за тиску на вході в комірку 0,159-0,161 МПа. Крива 1 відповідає величині МЕР 100 мкм, 2 – 200 мкм, 3 – 250 мкм.

У таблиці 4.2 наведено параметри ЕХО та основні результати експериментів за використання електрохімічної комірки з плоскопаралельним потоком електроліту. Як матеріал анода використовувалась Сталь 45. Застосовувалися водні розчини NaCl з концентрацією 0,5 М та 1 М за температури 32-33 °С. Кольором відмічено найбільш вдалі результати по шорсткості отриманої поверхні зразків.

Застосування низької концентрації електроліту 0,5 М NaCl (питома провідність – 0,048 1/(Ом·см)) у серії експериментів PS2E1 не дало бажаних результатів по шорсткості поверхні. Низька густина струму в експерименті PS2E1_1, як і очікувалось, не показала якісного результату. Збільшення густини струму в наступних експериментах цієї серії призвело до значного перевищення допустимої густини струму ($i/i_{PL} \gg 1$), що також не дало прийнятних результатів. Низький параметр питомої провідності електроліту за формулами розрахунку призводить до низького значення обмежуючої густини струму i_{PL} . Це не дає можливості застосувати високі значення густини робочого струму i , виконавши умову $i/i_{PL} \approx 1$. Відносно кращий результат у цій серії отримано в досліді PS2E1_8, в якому за високої густини струму за рахунок збільшення шпаруватості вдалося наблизитися до виконання цієї умови.

Таблиця 4.2 – Умови і результати експериментів анодного розчинення в електрохімічній комірці з плоскопаралельним потоком електроліту

№ експерименту	I_{oc} , А	i , А/см ²	U_{oc} , V	Провідність електроліту, 1/(Ом·см)	Тиск електроліту, МПа	Висота каналу, мкм	МЕР, мкм	Період, мс	Шпаруватість	Загальний час ЕХО, с	$I \cdot t$ (кількість електрики)	Товщина знятого шару (теор.), мкм	Товщина знятого шару (експ.), мкм	Вихід за струмом, %	Шорсткість поверхні поперек потоку R_a , мкм	Шорсткість поверхні вздовж потоку R_a , мкм	Швидкість електроліту, м/с	Товщина дифузійного шару δ , мкм	i/i_{PL}
PS2E1_1	10	8,8	1,6	0,048	0,162	300	210	1	10	60	60	19	15	80	2,23	2,4	3,5	6,1	0,96
PS2E1_2	17,2	15,2	6,3	0,048	0,162	300	200	2	10	100	172	50	40	81	2,56	1,95	3,5	6,0	1,94
PS2E1_3	30,4	26,9	15,6	0,048	0,159	300	250	1	10	60	182	54	45	84	2,69	1,72	3,5	6,5	3,04
PS2E1_4	37,6	33,3	21	0,048	0,158	300	200	1	10	60	226	63	55	87	2,87	2,23	3,5	6,0	3,59
PS2E1_5	30,4	26,9	16	0,048	0,158	300	200	1	5	60	365	96	95	99	2,02	2,26	3,5	6,0	4,87
PS2E1_6	20,4	18,1	13	0,048	0,162	300	190	1	5	100	408	104	100	96	2,36	2,71	3,5	5,9	3,23
PS2E1_7	30	26,5	11,5	0,048	0,158	300	100	1	25	200	240	60	55	92	1,69	1,82	2,4	5,4	1,42
PS2E1_8	42	37,2	13,6	0,048	0,162	300	100	1	50	20	17	5	5	94	1,53	1,4	2,4	5,4	1,27
PS2E2_1	23,1	20,4	11	0,097	0,154	500	300	2	10	140	323	91	95	104	4,14	2,82	5,6	5,9	1,29
PS2E2_2	34	30,1	11,8	0,097	0,157	500	200	2	25	90	122	36	40	110	1,47	1,23	5,1	5,3	0,99
PS2E2_3	39	34,5	11	0,097	0,158	500	150	2	10	60	234	63	60	95	2,40	1,66	3,6	5,4	2,09
PS2E2_4	33	29,2	11,6	0,097	0,156	500	200	1	10	60	198	56	60	106	2,07	2,26	5,1	5,3	1,47
PS2E2a_5	24,7	21,9	11	0,097	0,156	500	200	2	20	240	296	80	80	100	1,77	1,37	5,1	5,3	0,83
PS2E2a_6	25	22,1	10,7	0,097	0,157	500	200	2	5	60	300	81	85	105	2,51	1,92	5,1	5,3	2,11
PS2E2a_7	27	23,9	11,8	0,097	0,157	500	100	1	20	60	81	24	25	106	1,10	1,37	2,6	5,3	0,74
PS2E2a_8	27,6	24,4	14	0,097	0,157	500	100	1	4	150	1035	178	150	84	2,35	3,11	2,6	5,3	2,4
PS2E3_1	26,6	23,5	13,6	0,097	0,16	500	150	1	10	90	239	64	60	94	1,59	1,93	3,6	5,4	1,2
PS2E3_2	26,6	23,5	17,6	0,097	0,15	500	200	2	10	120	319	85	80	94	2,46	1,94	5,0	5,3	1,41
PS2E3_3	27,2	24,1	17,1	0,097	0,152	500	300	1	20	240	326	92	80	87	1,05	1,79	5,6	5,9	0,74

В подальших експериментах (серії PS2E2, PS2E3) як електроліт використовувався водний розчин 1 М NaCl. Крім того, збільшення висоти каналу до 500 мкм дало можливість отримати більшу швидкість електроліту перед анодом. При вході потоку в МЕП швидкість спадає завдяки дії гідравлічного опору. За значень МЕП 100 мкм швидкість становить 2,6 м/с, за МЕП 300 мкм – 5,6 м/с. При цьому значення товщини дифузійного шару суттєво не змінюються, тому що у розрахункових формулах для δ (4.2) – (4.5) бере участь еквівалентний діаметр живого перетину каналу потоку електроліту d_h , який компенсує збільшення швидкості зі збільшенням величини МЕП. Згідно з даними таблиці 4.2 найкращі результати по шорсткості поверхні в цих серіях отримано в діапазоні вищої густини струму, на різних швидкостях електроліту та за різних значень МЕП, але з майже однаковим параметром товщини дифузійного шару і обов'язковим виконанням умови неперевиконання обмежувачих значень густини імпульсного струму.

Провівши аналіз отриманих результатів, можна стверджувати наступне. Швидкість потоку електроліту в МЕП має двоякий вплив на процеси анодного розчинення. З одного боку, збільшення швидкості потоку веде до оновлення складу електроліту, виносу продуктів реакцій, відновлення первісної провідності МЕП, що приводить до стабілізації процесу. З другого боку, збільшення швидкості потоку і зміна величини МЕП впливають на товщину гідродинамічного пограничного шару і, відповідно, на товщину δ дифузійного шару. Як наслідок, зміна δ вносить обмеження на максимально допустиму густину струму і тривалість імпульсу за застосування імпульсних режимів ЕХО. Недотримання умов обмеження кількості підведеної в МЕП електрики з урахуванням гідродинаміки руху електроліту веде до погіршення якості обробленої поверхні.

4.2 Вплив термообробки на електрохімічне розчинення сталей в активуючому електроліті NaCl за використання імпульсного струму

Мікрогеометричні характеристики та стан поверхневого шару визначаються комплексом параметрів. Головними з них є хімічний та фазовий склад сплаву (сталі), а також його структура. Саме вони визначають електрохімічну гомогенність чи гетерогенність матеріалу. В першому випадку складаються передумови для високого класу чистоти поверхні, в другому – погіршення механічних властивостей поверхні.

За практичного застосування комбінованої технології електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом необхідно виготовляти деталі з ряду матеріалів, переважно інструментальних сталей з різною попередньою термообробкою і відповідною мікроструктурою. Крім того, електроерозійна обробка формує додаткові зміни в приповерхневих шарах залежно від технологічного режиму, що встановлено в ході досліджень розділу 3 дисертації.

Тому важливою задачею є встановлення закономірностей впливу попередньої термообробки сталей на процеси анодного розчинення за ЕХО імпульсним струмом і на основі цього створення уточненої математичної моделі для визначення кількісних параметрів процесу анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів, що мають нерівномірні по товщині електрохімічні характеристики, шляхом введення до розгляду змінного електрохімічного еквіваленту матеріалу поверхневого шару.

4.2.1 Результати експериментальних досліджень залежності виходу за струмом від попередньої термообробки і хімічного складу матеріалу зразків в умовах різної густини струму

Серії експериментів по встановленню впливу термообробки та складу сталей на коефіцієнт виходу за струмом при електрохімічному розчиненні проводилися за допомогою комірки (рисунок 4.10), детальний конструктив якої наведено в пункті 2.1.6. Геометричні параметри вибрані таким чином, щоб забезпечити однорідне електричне поле в плоскопаралельному потоці електроліту.

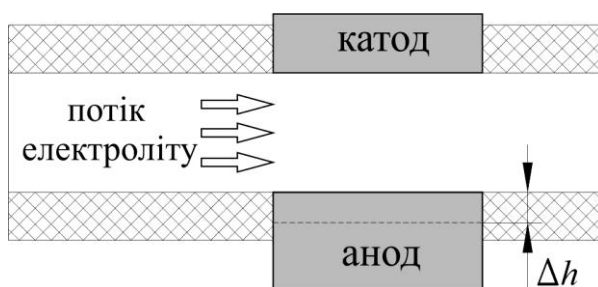


Рисунок 4.10 – Схема анодного розчинення в комірці з плоскопаралельним потоком електроліту

Коефіцієнт виходу за струмом визначався як відношення товщини знятого матеріалу, експериментально виміряної до теоретично розрахованої:

$$\eta = \frac{\Delta h_{\text{екс}}}{\Delta h_{\text{теор}}}. \quad (4.6)$$

У формулі для розрахунку товщини розчиненого шару

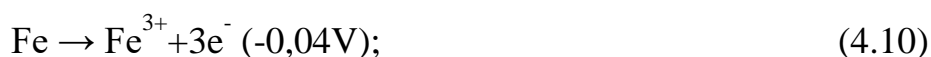
$$\Delta h_{\text{теор}} = \sqrt{h_0^2 + 2K_V \kappa U t} - h_0, \quad (4.7)$$

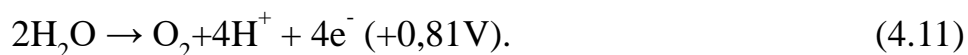
використовується K_V – об’ємний коефіцієнт електрохімічного розчинення матеріалу, який обчислюється за класичною формулою

$$K_V = \frac{C \cdot A}{n \cdot \rho}, \quad (4.8)$$

де C – стала Фарадея, A – атомна маса, ρ – густина металу, n – валентність.

Для двовалентного заліза K_V становить $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/(\text{А} \cdot \text{хв})$, для тривалентного – $1,47 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/(\text{А} \cdot \text{хв})$. В якому саме вигляді – двовалентного чи тривалентного заліза – буде йти розчинення, залишається невизначеним. Так, у довідниках [240] для Сталі 45 наведено значення $1,72 \cdot 10^{-3}$, тобто 1/3 двовалентного заліза, 2/3 – тривалентного ($K_{V_{\text{ст45}}} = 1,72 \cdot 10^{-3} = K_{V_{\text{Fe2}}} \cdot 0,34 + K_{V_{\text{Fe3}}} \cdot 0,66$). Тобто можливі конкурентні реакції: розчинення двовалентного заліза, розчинення тривалентного заліза і виділення кисню залежно від рівня енергії:





Згідно з електрохімічним рядом активності металів (таблиця 4.3) двовалентне залізо знаходиться лівіше тривалентного і повинно б було мати більший пріоритет при анодному розчиненні.

Таблиця 4.3 – Електрохімічний ряд активності металів

Mn^{2+}	V^{3+}	Cr^{2+}	Cr^{3+}	Fe^{2+}	Ni^{2+}	Mo^{3+}	Fe^{3+}	W^{3+}	W^{6+}	Cu^{2+}	Cu^+
-1,18	-0,87	-0,85	-0,74	-0,44	-0,23	-0,2	-0,036	+0,11	+0,68	+0,34	+0,52

Зважаючи на подібні експерименти, описані в зарубіжних публікаціях [46, 47], теоретичний коефіцієнт електрохімічного розчинення в роботі визначався за двовалентним залізом.

Значення густин струму, за яких проводились експерименти, умовно поділені на режими: А – 0-10 А/см², В – 10-40 А/см², С – 40-100 А/см². У більшості випадків практичного застосування ЕХРО ДЕ така градація відповідає значенням густини струму у відповідних зонах ІІІ, ІІ та І, що формуються дротяним електродом на поверхні анода, розглянутим у пункті 4.3.1 (рисунок 4.25) у дослідженнях процесів локалізації анодного розчинення.

Тривалість імпульсів вибиралась (якщо не зазначено інше) близькою до критичного значення, але не перевищувала його згідно з умовою $i_{\max} \leq i_{PL}$.

Результати експериментів щодо встановлення коефіцієнта виходу за струмом при розчиненні в активуючому електроліті NaCl з концентрацією 1 М на літр залежно від попередньої термообробки зразків сталей наведені нижче.

У першому випадку (рисунок 4.11) дослідні зразки були не повністю відпалені з утворенням структури ферит + перліт з мілкими кулеподібними карбідами. При густині струму 10-40 А/см² спостерігається близький до 100 % коефіцієнт виходу за струмом. На ділянці 50-100 А/см² отримано па-

діння виходу за струмом. Порівняння з ARMCO-залізом дає змогу встановити вплив наявності вуглецю у складі сталей на коефіцієнт виходу за струмом.

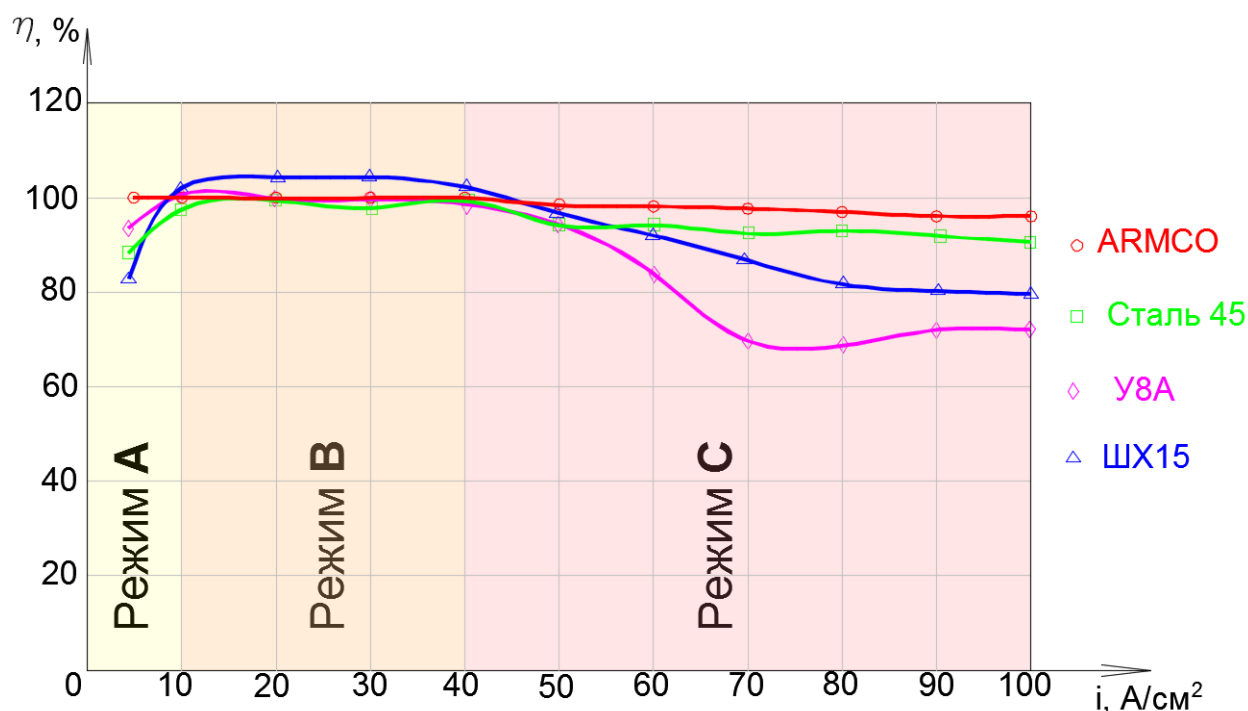


Рисунок 4.11 – Коефіцієнт виходу за струмом при анодному розчиненні сталей неповного відпалювання і ARMCO-заліза

Більшу залежність від процентного вмісту вуглецю в сталях показали досліди з повністю відпаленими зразками — структура перліт + ферит, пластинчастий перліт, решітчастий цементит (рисунок 4.12). На всіх зразках отримано менший 100 % вихід за струмом. Спостерігалось проходження побічних реакцій у вигляді виділення кисню.

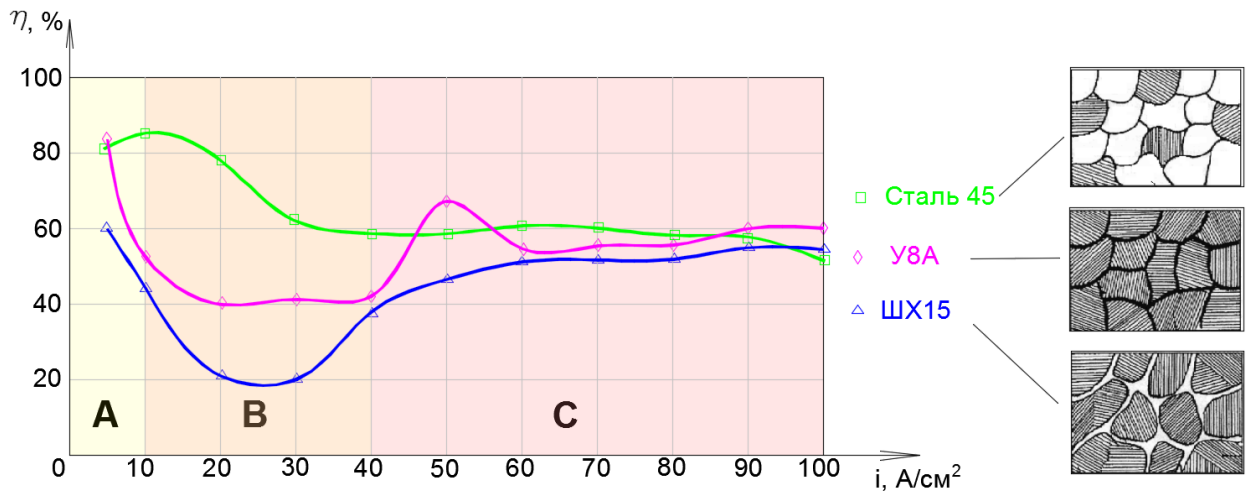


Рисунок 4.12 – Коефіцієнт виходу за струмом при анодному розчиненні повністю відпалених сталей

На малих густинах струму до 10 А/см^2 відбувається двовалентне розчинення заліза з невеликим виділенням кисню і відносно високим виходом за струмом.

На ділянці $20\text{--}40 \text{ А/см}^2$ спостерігається інтенсивне виділення кисню і різке падіння коефіцієнта виходу за струмом. Причому у сталей з більшим вмістом вуглецю вихід за струмом менший.

На ділянці $50\text{--}100 \text{ А/см}^2$ вихід за струмом підвищується. Це може означати перехід до розчинення іонів тривалентного заліза, рухомість яких в електричному полі вища, ніж іонів двовалентного заліза.

Загартовані зразки сталей У8А та ШХ15 до отримання мартенситної структури показали високий стабільний коефіцієнт виходу за струмом на всьому проміжку густини струму (рисунок 4.13). Гомогенний твердий розчин атомарного вуглецю сприяє рівномірному розчиненню мартенситної фази.

Інший режим гартування сталі Х12Ф1 з отриманням структури мартенситу з решітчастим цементитом призвів до значного зменшення виходу за струмом (рисунок 4.13) і погіршення обробленої поверхні.

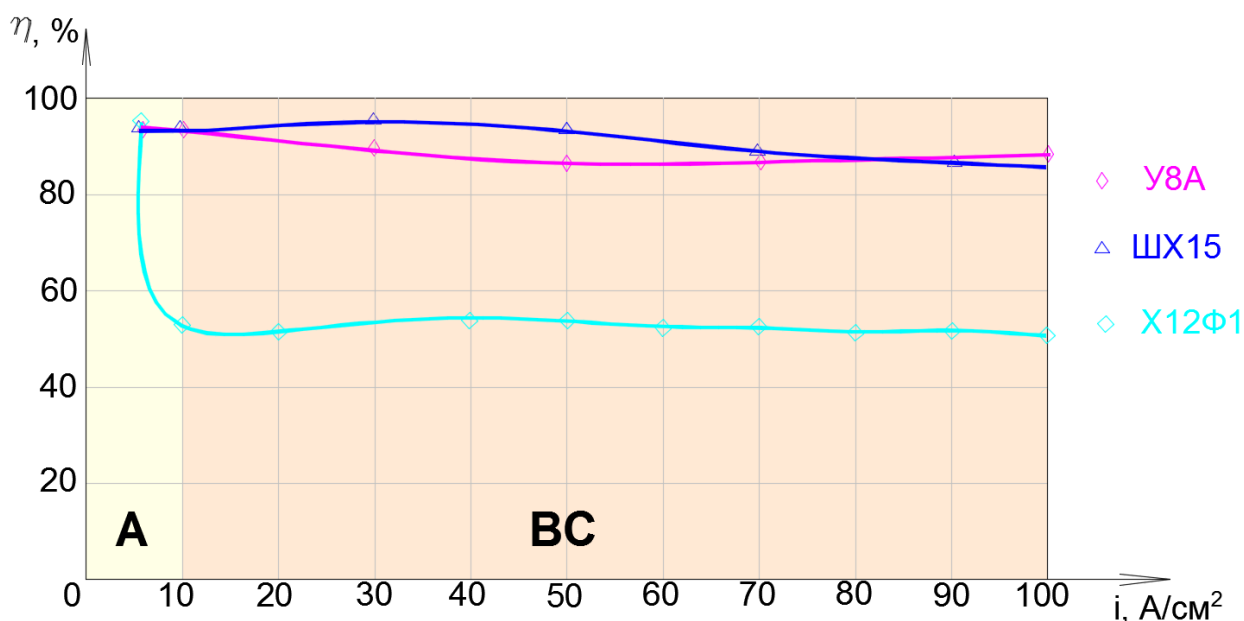


Рисунок 4.13 – Коефіцієнт виходу за струмом при анодному розчиненні загартованих сталей У8А, ШХ15 (мартенсит), загартованої (Ас1) сталі Х12Ф1 (решітчастий цементит і мартенсит)

4.2.2 Результати аналізу чинників та механізмів електрохімічного розчинення термооброблених сталевих зразків

Важливою складовою наукових досліджень є проведення аналізу отриманих даних для встановлення певних закономірностей, які можна поширити на більш широке коло матеріалів і режимів обробки. На основі фактичних експериментальних даних коефіцієнтів виходу за струмом за електрохімічного розчинення вибраних зразків сталей, наведених вище, у цьому пункті ставиться задача встановлення механізмів процесу розчинення та чинників, які впливають на нього. Експерименти показали суттєву залежність коефіцієнта виходу за струмом від попередньої термообробки і складу зразків, що доводить важливість проведення такого аналізу з метою використання основних положень у проектуванні конкретних технологічних процесів за комбінованою технологією ЕЕВО та ЕХРО.

Протягом проведення експериментів проводилося спостереження за динамікою зміни якості поверхні зразків, станом МЕП за його електричними параметрами по осцилограмах струм-напруга та параметрами електроліту на

виході з комірки. Варіацією швидкості електроліту, величини МЕП, амплітудно-часових характеристик струму досягалася зміна умов електрохімічного розчинення з метою встановлення природи процесів, що відбуваються в МЕП, та механізмів видалення матеріалу.

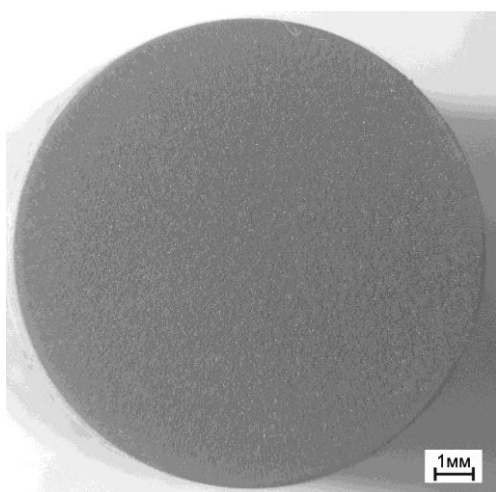
Проведені експерименти електрохімічного розчинення сталей неповного відпалу та ARMCO-заліза, результати яких зображено на рисунку 4.11, та їх аналіз дають можливість виявити наступні закономірності:

- ARMCO-залізо рівномірно розчиняється зі 100 % виходом за струмом на всьому досліджуваному діапазоні густин струму згідно з реакцією (4.9) – розчинення Fe^{2+} ;

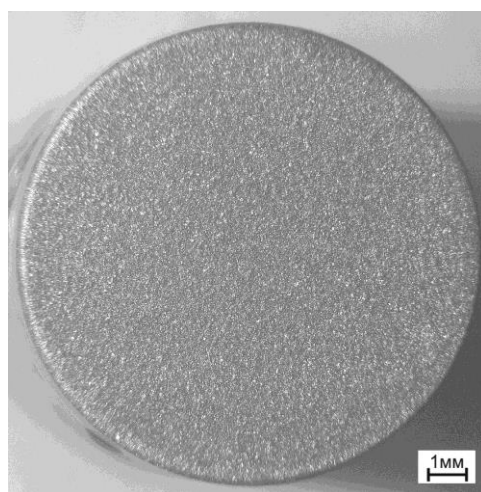
- сталь ШХ15 на режимі В за густини струму $10\text{--}40 \text{ А/см}^2$ розчиняється з коефіцієнтом виходу за струмом, більшим 100 %; очевидно, процес розчинення супроводжується механічним видаленням електрохімічно інертних карбідів Fe_3C потоком електроліту;

- суттєвої залежності якості поверхні від швидкості руху електроліту не спостерігається;

- у вуглецевмісних сталях на режимі С за густини струму $60\text{--}100 \text{ А/см}^2$ здійснюється перехід на розчинення Fe^{3+} , реакція (4.10), спостерігаються відсутність значного газовиділення, наявність залишкової чорної плівки оксидів заліза (рисунок 4.14, а).



а)

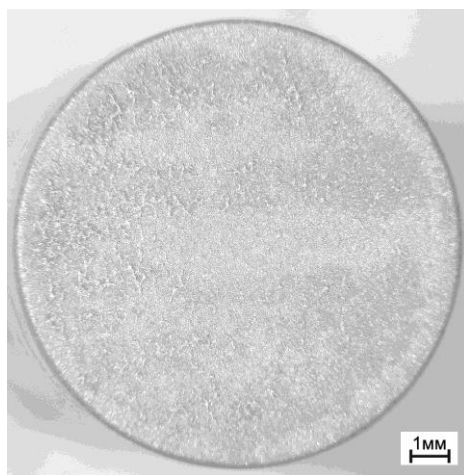


б)

Рисунок 4.14 – Зразок діаметром 12 мм, матеріал – У8А (неповний відпал), густина струму – 70 А/см^2 : *а*) утворена чорна плівка на поверхні після ЕХО; *б*) поверхня зразка з видаленою промиванням плівкою

Натомість розчинення сталей повного відпалу (рисунок 4.12) з гетерогенною структурою відбувається проблемно й нестабільно, при цьому виявляється суттєва залежність від швидкості руху електроліту за прикритичної тривалості імпульсів ($i_{\text{lim}} \approx i_{\text{PL}}$).

Сталь 45 (рисунок 4.12) за густини струму 20 А/см^2 показує відносно високий коефіцієнт виходу за струмом, але спостерігається смугасте розчинення. Характер смуг уздовж потоку на поверхні зразка збігається з характером розподілу швидкостей електроліту (рисунок 4.15, *а*, *б*). Більш рівномірне розчинення вдалося отримати на режимі з густиною струму 70 А/см^2 , скоротивши тривалість імпульсів до значень, значно менших критичних.



а)

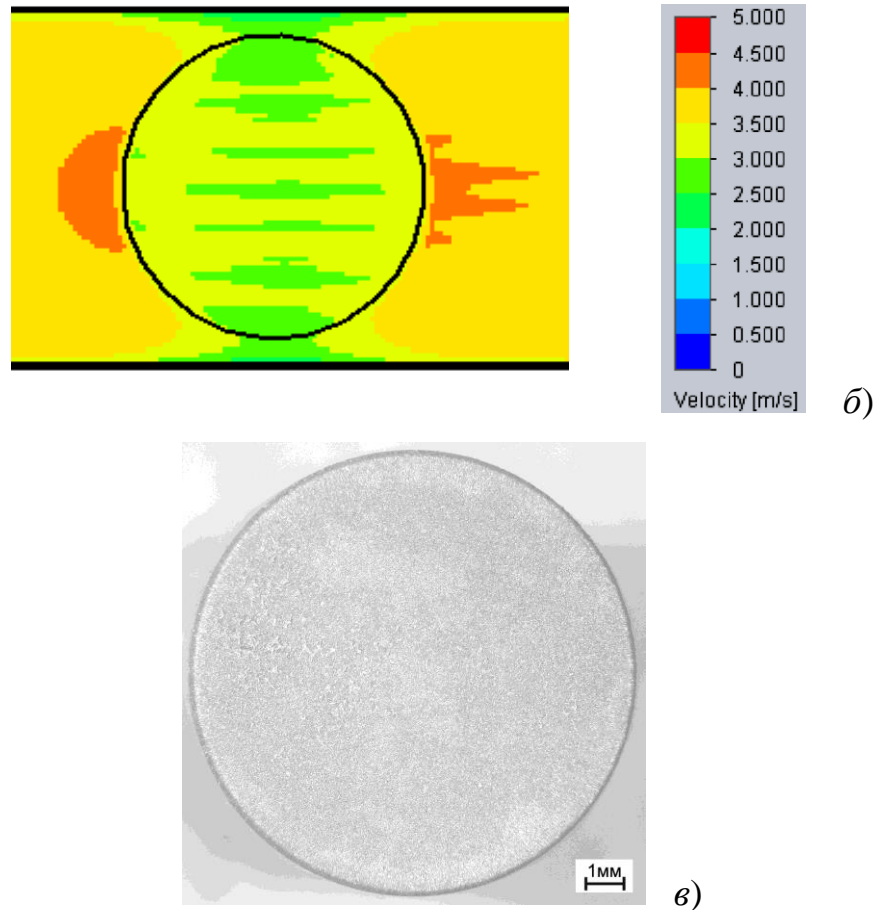


Рисунок 4.15 – Зразок діаметром 12 мм, матеріал – Сталь 45 (повний відпал): *а)* смугасте розчинення, густина струму – 20 A/cm^2 , тривалість імпульсів близька до критичної; *б)* поле швидкостей електроліту в прианодній зоні; *в)* рівномірне розчинення, густина струму – 70 A/cm^2 , тривалість імпульсів значно менша критичної

Сталі У8А та ШХ15 на режимі В (густина струму – $10\text{-}40 \text{ A/cm}^2$) показують найнижчий коефіцієнт виходу за струмом (рисунок 4.13). Спостерігається гребінчаста поверхня після розчинення, гребінці розташовані поперек потоку електроліту (рисунок 4.16). Встановити механізми розчинення в цьому випадку вдалося завдяки порівнянню отриманих результатів з даними провідних дослідників.

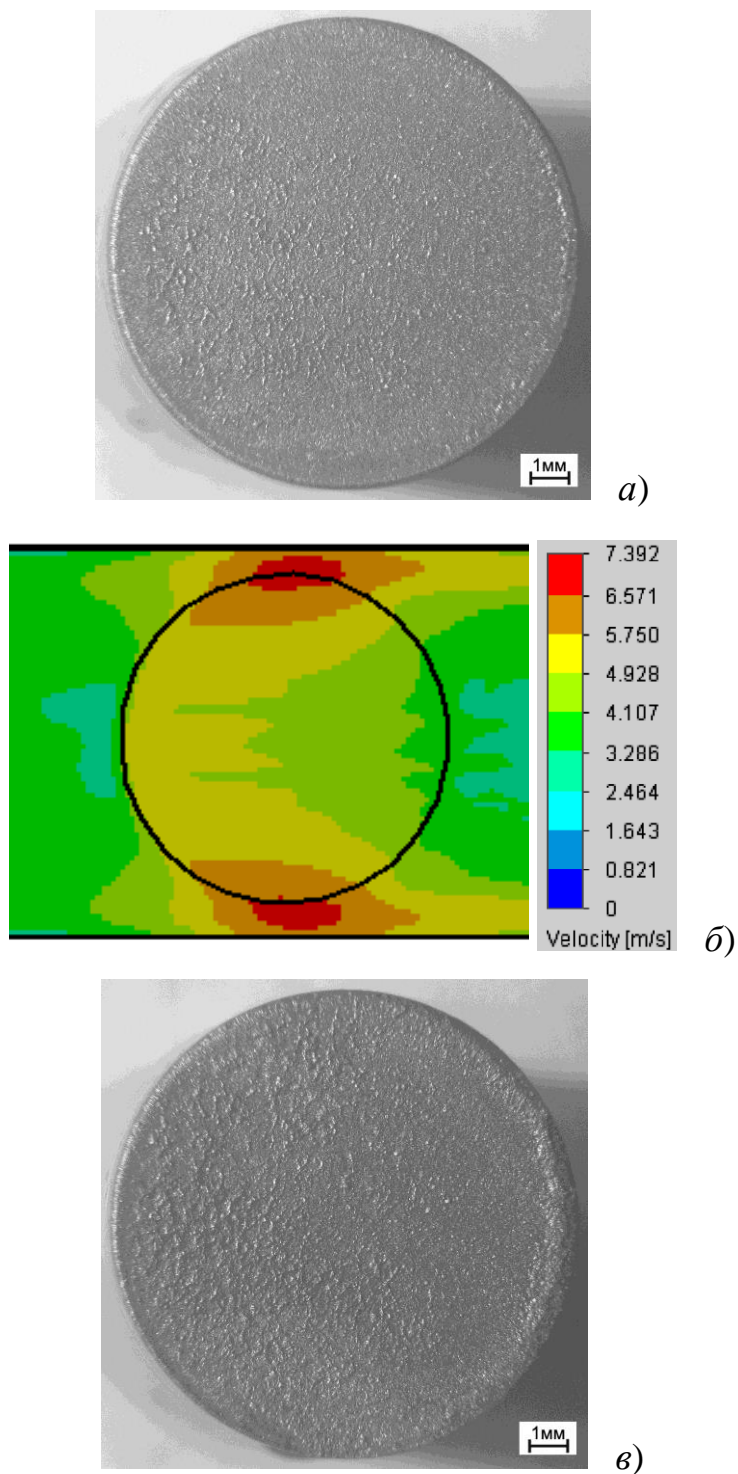


Рисунок 4.16 – Зразки діаметром 12 мм, гребінчасте розчинення:
 а) сталь У8А (повний відпал), густина струму – 40 A/cm^2 ; б) поле швидкостей
 електроліту в прианодній зоні; в) сталь ШХ15 (повний відпал), густина стру-
 му – 30 A/cm^2

Німецькі вчені Klocke F. з колегами навели схему розчинення (рисунок 4.17) гетерогенної структури сталі на основі розрахунку з використанням математичної моделі. Зерна цементиту є електропровідними, але електрохімічно інертними. Це зумовлює місцевий мікроперерозподіл густини струму і викликає інтенсивне розчинення фериту з підвищеною густиною струму, що призводить до невиконання умови $i_{\max}=i_{PL}$ і настає дифузійне обмеження процесів розчинення металу. Активізуються побічні реакції, інтенсивне виділення кисню змінює місцевий рН-фактор, утворюються оксидні плівки.

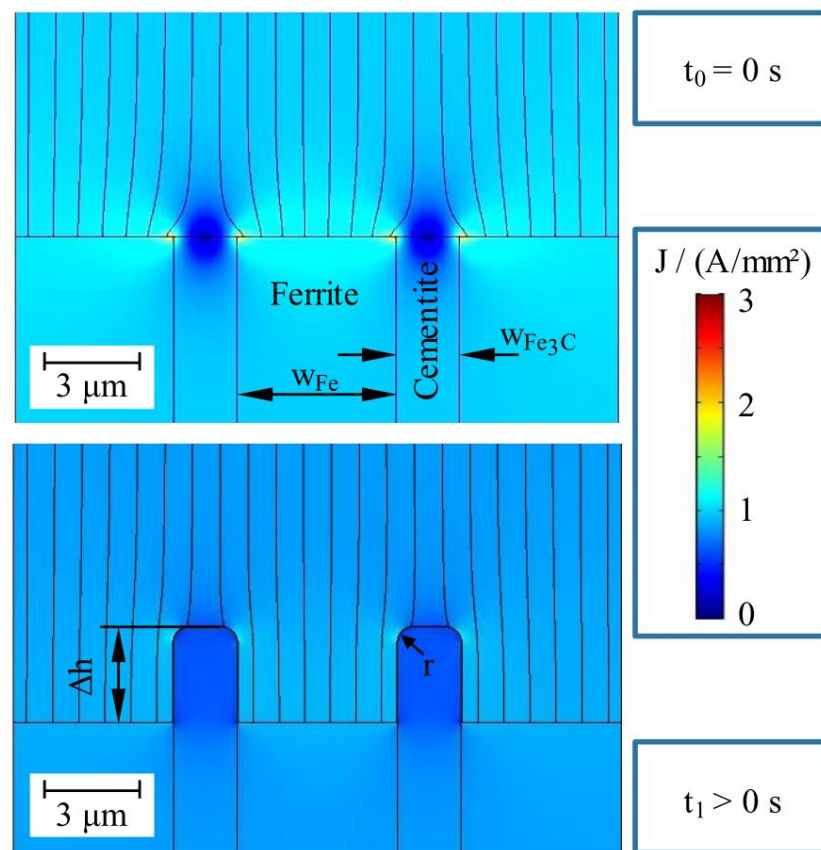


Рисунок 4.17 – Розподіл густини струму на початку обробки (зверху) і в процесі обробки при однакових швидкостях розчинення (внизу) [76]

Зерна цементиту, які з часом підносяться над поверхнею, формують когерентні структури на поверхні анода, викликають утворення і розвиток вихорів в потоку електроліту, через це порушується рівномірність товщини дифузійного шару і відбувається вибіркове посилення інтенсивності розчинення

(рисунок 4.18). Польські вчені Kozak J. з колегами встановили залежність періодичності гребінчастої структури поверхні після електрохімічного розчинення від чисел Рейнольдса потоку електроліту.

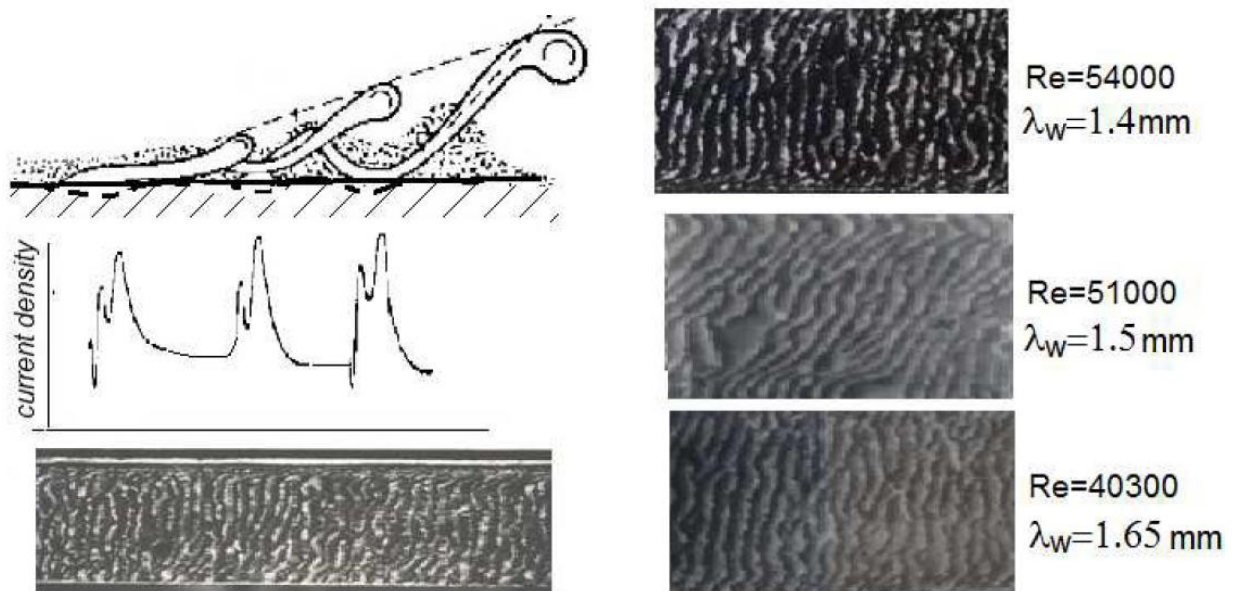


Рисунок 4.18 – Утворення вихорів на когерентних структурах, розподіл миттєвої густини струму по траєкторії потоку, формування гребінчастої структури на поверхні за різних чисел Рейнольдса (штампова сталь, електроліт – 15 % NaCl, густина струму – 20-24 А/см²) [84]

Найкращі результати і за коефіцієнтом виходу за струмом, і за якістю отриманої поверхні показали загартовані сталі (рисунок 4.13). Встановлено такі характеристики процесу електрохімічного розчинення:

- відбувається рівномірне розчинення гомогенної структури мартенситної фази (сталі У8А, ШХ15) з високим стабільним коефіцієнтом виходу за струмом;
- відбувається розчинення двовалентного заліза, вивільнені атоми вуглецю видаляються потоком електроліту без витрат електрики;
- режим гартування сталі Х12Ф1 з отриманням структури мартенситу з решітчастим цементитом призводить до значного зменшення виходу за струмом, інтенсивного виділення O_2 і погіршення стану поверхні.

На всіх режимах відбувається переважне розчинення двовалентного заліза, про що свідчить високий коефіцієнт виходу за струмом. На рисунку 4.19 зображено поверхню зразка сталі У8А: після розчинення на поверхні залишається темна плівка з блискучими рівномірно розташованими краплями, яка легко змивається, і отримуємо якісну поверхню (рисунк 4.19, б).

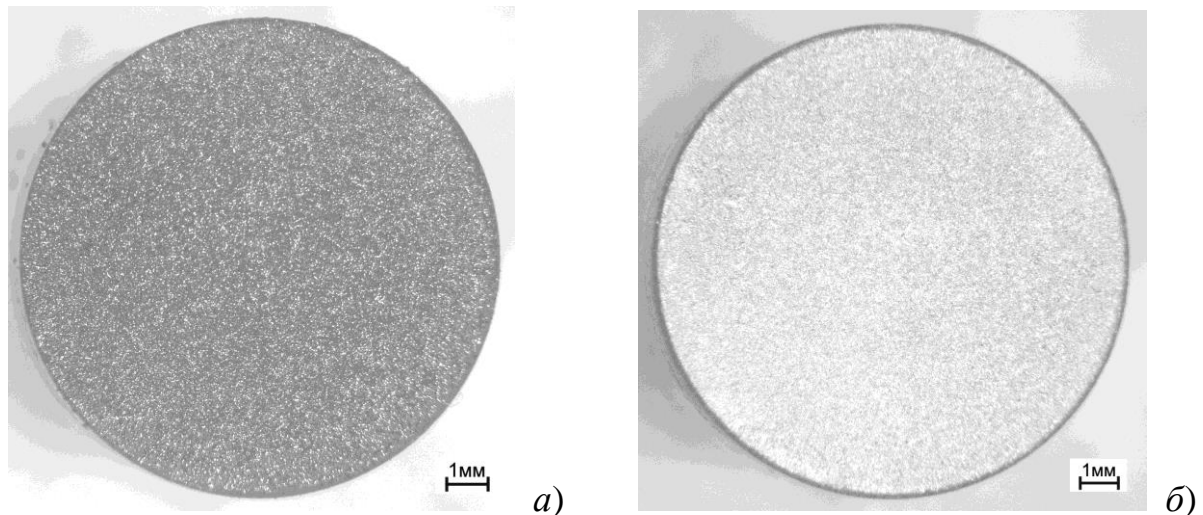


Рисунок 4.19 – Зразок діаметром 12 мм, матеріал – У8А (загартований), густина струму – 50 A/cm^2 : а) темна плівка з блискучими рівномірно розташованими краплями; б) промита поверхня

Однак режим гартування сталі Х12Ф1 з отриманням структури мартенситу з решітчастим цементитом призводить до значного зменшення виходу за струмом (рисунк 4.13), інтенсивного виділення кисню і погіршення стану поверхні (рисунк 4.20).

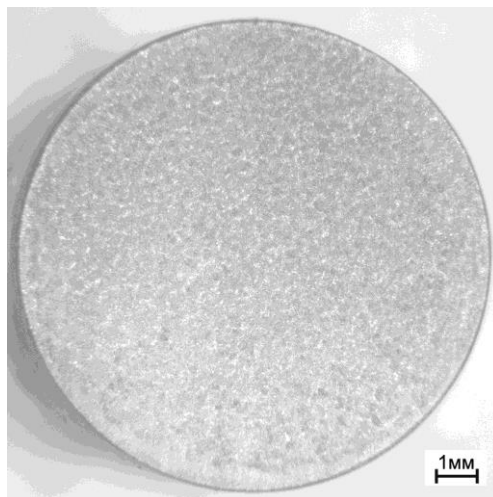


Рисунок 4.20 – Зразок діаметром 12 мм, матеріал – сталь Х12Ф1 (загартований з отриманням структури мартенситу з решітчастим цементитом), густина струму – 50 A/cm^2 .

4.3 Особливості процесів електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом-інструментом

Технологічна схема ЕХРО із застосуванням порівняно тонких дротяних електродів як катода має особливості, що полягають у суттєвій нерівномірності електростатичного поля. Пік розподілу густини струму знаходиться на вузькій ділянці анода навпроти центру дротяного катода і різко спадає з віддаленням до периферії. З одного боку, це спричиняє певні труднощі у забезпеченні рівномірності анодного розчинення, однак, з другого боку, з'являється ефективний інструмент електрохімічної поверхневої обробки з високими локалізуючими характеристиками.

Інша проблематика в реалізації технологічної схеми полягає у забезпеченні рівномірного потоку електроліту у вузькому МЕП по всій висоті ДЕІ. Швидкісний режим руху електроліту обов'язково повинен узгоджуватися з кількістю електрики, поданої в МЕП. Застосування імпульсного струму дає можливість керованого впливу на перебіг процесу завдяки вибору амплітуд-

но-часових параметрів струму, що забезпечить повне відновлення властивостей електроліту протягом релаксаційного проміжку часу між імпульсами.

Отже, існує цікава царина досліджень взаємного впливу гідродинамічних параметрів потоку електроліту в МЕР, амплітудно-часових характеристик імпульсного струму, інших параметрів технологічної схеми на ефективність та локалізуючі характеристики анодного розчинення, що забезпечують точність і якість отриманої поверхні за ЕХРО дротяним електродом у складі комбінованої технології електроерозійної та електрохімічної обробки.

4.3.1 Обґрунтування інформативного критерію локалізації процесу анодного розчинення при використанні циліндричних дротяних електродів

У ряді технологічних процесів, наприклад при електрохімічному формоутворенні деталей машин і приладів, потрібне локально спрямоване анодне розчинення металу. Інакше кажучи, в цих процесах потрібна висока локалізація процесу анодного розчинення, що забезпечує підвищену точність формоутворення. Локалізуюча здатність є антиподом розсіюючої здатності, яка забезпечує рівномірність розчинення. Критерієм високої локалізуючої здатності є виконання двох умов: поляризованість металу повинна наближатися до нуля і питома розчинність металу зі зростанням анодного потенціалу має зростати, тобто необхідне дотримання таких співвідношень [208]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_a}{di} \rightarrow 0, \\ \frac{d\gamma}{d\varphi_a} > 0; \end{array} \right. \quad (4.12)$$

де φ_a [В] – анодний потенціал, γ [г/Кл] – питома розчинення металу, i [А/м²] – густина струму.

Поляризаційну здатність металу визначають за анодною поляризаційною кривою $i = f(\varphi_a)$, друге співвідношення – із залежності питомого розчинення металу від анодного потенціалу $\gamma = f(\varphi_a)$.

Анодна поведінка одного і того ж металу в різних електролітах суттєво різниться. Так, наприклад, для сталі ХВГ стаціонарний потенціал у розчині хлориду натрію на 1 В зміщений у від'ємну область, порівняно з потенціалом у розчині нітрату натрію (рисунок 4.21). У хлоридних розчинах незначне відхилення потенціалу в анодну область веде до зростання струму анодного розчинення.

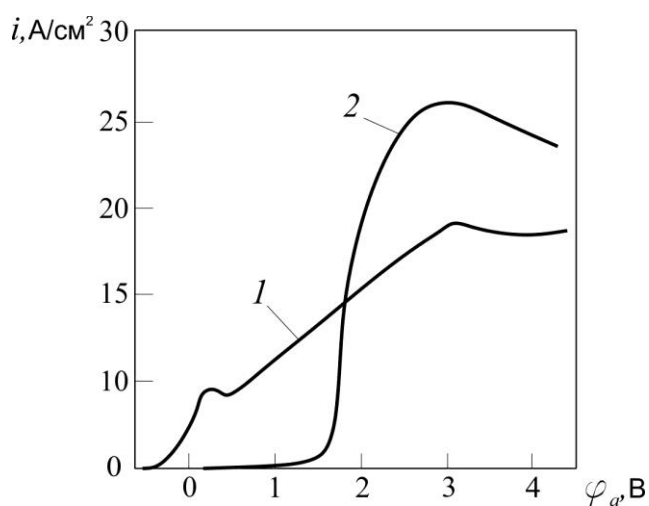


Рисунок 4.21 – Анодні потенціостатичні поляризаційні криві сталі ХВГ за анодного розчинення у водних розчинах 1 М: 1 – NaCl, 2 – NaNO₃ [208]

Поляризаційні криві в нітратних розчинах мають S-подібну форму. В цих розчинах різке зростання швидкості розчинення починається при потенціалах, що на 1,5 В позитивніші стаціонарного. При досягненні цих потенціалів різко активується поверхня металу, розчинення супроводжується незначною поляризацією. Мала поляризація металу має місце на дуже короткій ділянці анодних потенціалів. При більш високих потенціалах струм розчинення наближається до граничного (при даній концентрації, температурі і швидкості потоку) і далі практично не залежить від потенціалу. Граничний струм за анодного розчинення металу в режимі високих потенціалів обумовлений дифузійно-міграційними обмеженнями. Спеціальними дослідженнями з точності формоутворення встановлено [208], що в діапазоні потенціалів, які відповідають найменшій поляризації ($d\phi_a/di \rightarrow 0$), спостерігаються найбільша

локалізація процесу анодного розчинення і найменша похибка форми виробу. Таким чином, поляризаційна здатність металу служить критерієм локалізації процесу електрохімічної обробки металів.

У розчинах хлористого натрію, навпаки, агресивні Cl^- -іони взаємодіють з ґратами металу вже при стаціонарному потенціалі. Ця енергійна взаємодія при значеннях φ_a , близьких до стаціонарного потенціалу, настільки послаблює зв'язок поверхневих атомів металу з ґратами, що швидкість переходу атомних шарів у розчин сильно зростає. При цьому інтенсивне розчинення поверхневих шарів безперервно підтримує поверхню металу в чистому стані, без ознак пасивації під шаром розчину. Дійсно, поверхня металу після анодного розчинення в розчині хлоридів є блискучою, в той час як у нітратних розчинах – матовою, зі слідами новоутворень. У розчині хлориду натрію поляризація на всьому діапазоні анодних потенціалів становить значну позитивну або негативну величину, але ніде не наближається до нуля, як у нітратних розчинах (рисунок 4.21). Внаслідок цього розсіююча здатність у хлоридних розчинах в усьому діапазоні анодних потенціалів висока, локалізуюча ж здатність низька, і точність формоутворення набагато менша, ніж у нітратних розчинах.

Для більшості аноднорозчинних металів у різних електролітах залежність $\gamma = f(\varphi_a)$ має зростаючу ділянку: питома розчинення металу зі зростанням анодного потенціалу зростає. Цей характерний діапазон анодних потенціалів є різним для різних металів і електролітів, але він завжди має місце. У цьому діапазоні потенціалів відбувається інтенсивне руйнування кристалічної решітки металу, назване явищем анодно-аніонної активації. При проведенні процесу в потенціостатичному режимі максимальна продуктивність анодного розчинення забезпечується в тому випадку, якщо анодний потенціал, що надається деталі-заготовці, знаходиться в зазначеному діапазоні потенціалів.

Локалізуюча здатність електроліту, а отже, і точність обробки можуть бути істотно підвищені в разі використання як катода відносно малих діаметрів (0,1 – 0,3 мм) дротяних електродів. Завдяки формі дротяного електрода до анода підводиться суттєво нерівномірне електричне поле. За рахунок формування необхідного діапазону потенціалів на вузькій ділянці поверхні по висоті анода досягається значна локалізація процесу розчинення. Величина, тривалість дії та характер розподілу густини струму суттєво визначають як швидкість обробки, так і показники якості отриманої поверхні. Особливо важливим це питання постає при обробці складнопрофільних деталей, де, на відміну від традиційної електрохімічної обробки, за умов ЕХОДЕ технологічна можливість локалізувати процес обробки, а отже, забезпечити відносно невелику зону розтікання технологічного струму практично визначає керованість процесу і його кінцеві результати.

У дисертаційній роботі побудовано математичну модель (пункт 2.3.2), що зв'язує ряд технологічних параметрів з розподілом потенціалу між електродами і, відповідно, з кількісними показниками і локалізацією процесу електрохімічного розчинення. Це сприяє вирішенню проблеми керованості процесом електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом, прогнозованості її результатів.

Приклад розрахунку розподілу потенціалу в області, зайнятій електролітом, зображено на рисунку 4.22 для таких вихідних даних: радіус дроту-електрода – 0,075 мм; МЕР – 0,5 мм; висота деталі – 10 мм; провідність електроліту відповідає провідності 6 % водного розчину NaCl за температури 30 °C; потенціостатичний режим – напруга на МЕР 4 В.

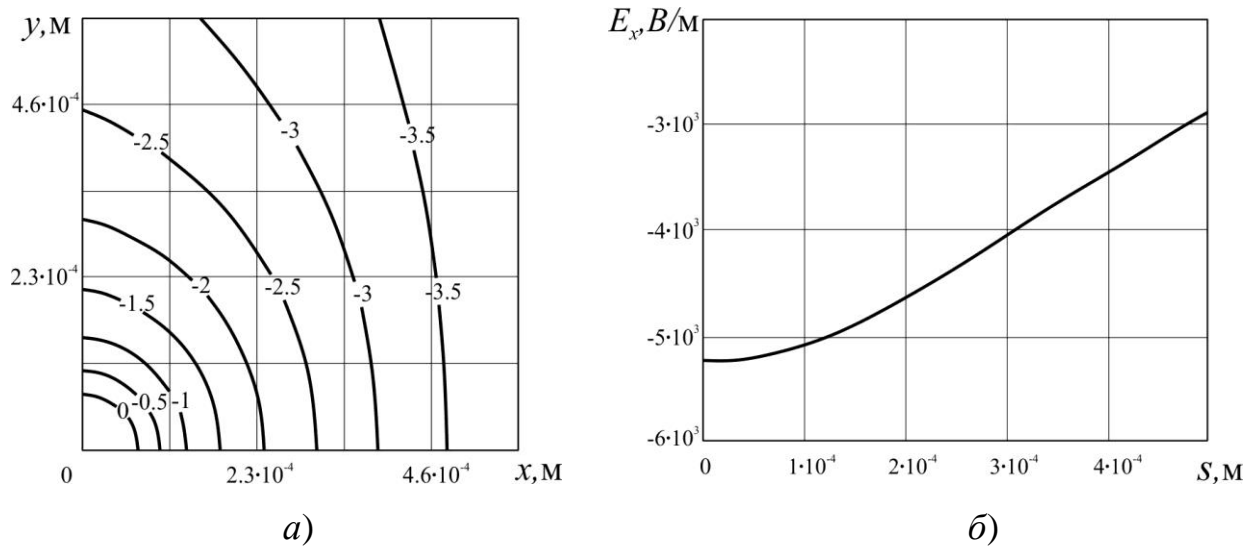


Рисунок 4.22 – Розподіл електростатичного поля в МЕП: а) еквіпотенціальні лінії; б) напруженість поля на аноді (s – координата вздовж поверхні анода)

Для перевірки розрахункової схеми проведено серії експериментальних досліджень по визначенню геометричних параметрів канавок, що утворюються внаслідок електрохімічного розчинення металу деталі при нерухомому положенні дроту-електрода. Час процесу для кожної позиції становив 300 с, частота проходження імпульсів – 1 кГц, тривалість імпульсів – 300 мкс, напруга в МЕП – 4 В. Електроліт – 6 % розчин NaCl за температури 30 °С. Вимірювання виконувалися для діаметрів дроту 0,15, 0,2, 0,25 мм на геометричних величинах МЕП 0,5, 0,3, 0,2, 0,1, 0,05 мм. Форма отриманих канавок визначалася за допомогою засобів реєстрації та методики математичної обробки параметрів рельєфу поверхні, описаних у підпункті 2.1.8.2.

На рисунку 4.23 зображено суміщені профілі канавок, експериментально визначених та розрахованих за розробленою математичною моделлю для дроту-електрода діаметром 0,15 мм при величинах МЕП 0,5, 0,3, 0,2 мм. Інші варіанти експериментальних і розрахункових даних також дають прийнятний збіг.

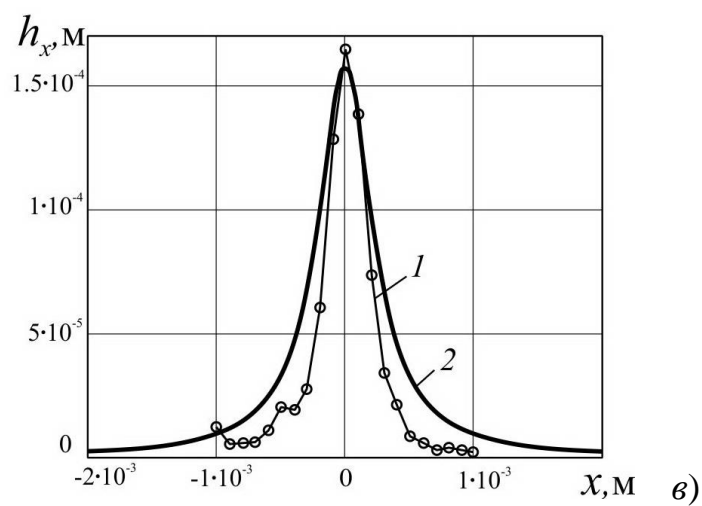
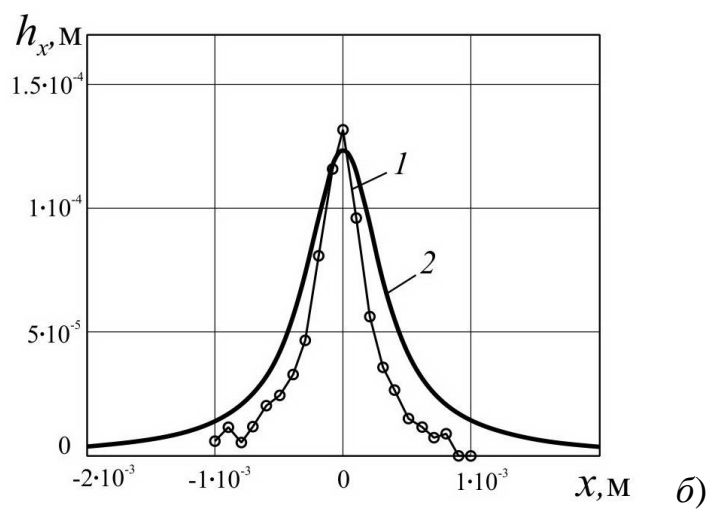
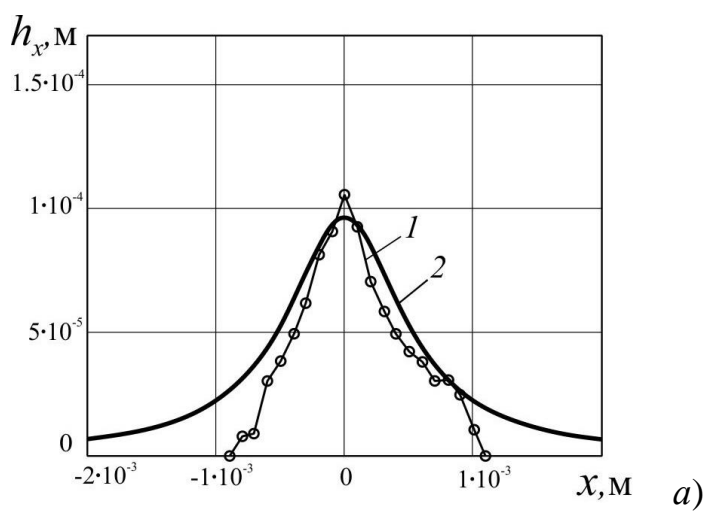


Рисунок 4.23 – Суміщені профілі вимірюваних (1) і розрахованих (2) канавок за використання дроту-електрода діаметром 0,15 мм при різних величинах МЕР: а) 0,5 мм, б) 0,3 мм, в) 0,2 мм

Аналізуючи отримані результати, провівши обчислювальні експерименти з використанням математичної моделі, вдалося визначити основні тенденції в зміні ступеня локалізації електрохімічного розчинення металів залежно від варіації діаметра дроту-електрода, величини МЕР, напруги в МЕР, складу і температури електроліту, матеріалу і товщини оброблюваної деталі.

На основі результатів проведеного аналізу в дисертаційній роботі вирішується проблема створення науково обґрунтованих методів оцінювання локалізації процесу анодного розчинення в електрохімічній комірці з циліндричним електродом.

Як уже відомо, для забезпечення високої швидкості обробки використовують активуючі електроліти з великою електропровідністю, в той час як для отримання високоякісної поверхні користуються пасивуючими електролітами з меншою електропровідністю [213, 230, 241].

Існує кілька методів визначення локалізуючої здатності ЕХО, тобто точності відтворення форми деталі при електрохімічній обробці. Найбільш часто застосовується логарифмічний індекс розсіювання (ЛІР), який запропонував D. T. Chin для технологічного процесу електроосадження [14, 167]. Він запропонував формулу

$$M = L^{1/A}, \quad (4.13)$$

де M – відношення мас осажденного металу на поверхнях з більшим l_f і меншим l_n міжелектродним проміжком, L – відношення l_f / l_n або i_n / i_f , i_n – первинна густина струму на поверхні анода на меншому МЕР, коли там немає поляризації, i_f – первинна густина струму на більшому МЕР за тих же умов, A – логарифмічний індекс розсіювання: обернений нахил графіка $\log(M)$ від $\log(L)$. Ця залежність показала найкраще узгодження з експериментальними даними і зберегла умову «єдиного» параметра для опису системи, що є важливим для практичного використання в дослідженнях ЕХО. Проте первинний розподіл струму на електроді в електролітичній ванні значною мірою визначається геометрією ванни, її розміром, формою і розміщенням

електродів к ванні. Електрохімічна комірка Херінг-Блума, яка найчастіше використовується для визначення розсіюючої здатності, накладає обмеження на застосування рівняння (4.13) і унеможливорює його використання для електролітичних ванн з іншими геометричними параметрами. На практиці реальний вихід по струму вздовж електрода має тенденцію ставати більш рівномірним через різні поляризаційні ефекти і змінну густину струму. Також впливають на розподіл струму в МЕП зміни первинного розподілу густини струму вздовж зони, що обробляється.

Отже, значення ЛПР, яке визначається за допомогою відношень між плоским електродом і деталлю і дає інтегральну характеристику локалізації процесів ЕХО, не може бути ефективним критерієм оцінювання локалізації при ЕХОДЕ. Це пов'язано з тим, що конфігурація напруженості електричного поля в електрохімічній комірці з циліндричним електродом є складною нелінійною залежністю від величини МЕП та діаметра дроту [125, 217], що практично усуває можливість адекватно оцінити вплив складу електроліту та амплітудно-часових параметрів джерела живлення (АЧПДЖ) на локалізованість процесу розчинення.

В роботі [216] автори спробували вирішити проблему підвищення точності електрохімічного формоутворення шляхом введення безрозмірних геометричних критеріїв, які визначалися на основі аналізу геометрії порожнини, утвореної електрохімічним розчиненням торця нікелевої фольги. Аналіз виконувався за допомогою комп'ютерної обробки отриманих фотографій. Запропонований підхід та обрані геометричні безрозмірні критерії дали можливість авторам виявити суттєвий вплив амплітудно-часових параметрів джерела живлення (АЧПДЖ) на точність відтворення форми електрода інструменту. Спроба використати суто геометричні критерії для оцінювання рівня впливу АЧПДЖ та складу електроліту на локальність процесу розчинення в електрохімічній комірці з циліндричним електродом виявила їх низьку інформативність, знову ж таки, через проблеми зі змінами конфігурації напруженості електричного поля в зоні обробки.

Таким чином, відсутність обґрунтованих критеріїв оцінювання локалізації процесу анодного розчинення при використанні технологій ЕХОДЕ робить проблематичним точний теоретичний розрахунок технологічних параметрів процесу обробки. Це сприяє використанню чисто емпіричних підходів до вибору параметрів обробки, що стримує розвиток ЕХОДЕ як технології.

Для розробки та обґрунтування методики визначення рівня локалізації електрохімічного розчинення при обробці дротяним електродом за критеріями, які, з необхідним ступенем адекватності, дають змогу оцінити вплив на локалізацію процесу розчинення властивостей електроліту та параметрів джерела живлення, проведено суміщення профілю експериментально отриманої канавки, розподілу густини підведеного струму на поверхні анода і теоретично розрахованого профілю канавки для різних значень МЕР (рисунок 4.24).

Побудовано профіль експериментально отриманої канавки (крива 1, рисунок 4.24). Розподіл густини підведеного струму (крива 2, рисунок 4.24) на поверхні анода в початковий момент часу (первинний розподіл технологічного струму) для системи «циліндричний дротяний катод – плоский анод» отримано за точним аналітичним розв'язком (пункт 2.3.2). Теоретично розрахований профіль канавки (крива 3, рисунок 4.24) отримано чисельно за методом скінченних елементів у середовищі розрахункового пакета COMSOL Multiphysics в модулі Electrochemistry (пункт 2.3.4).

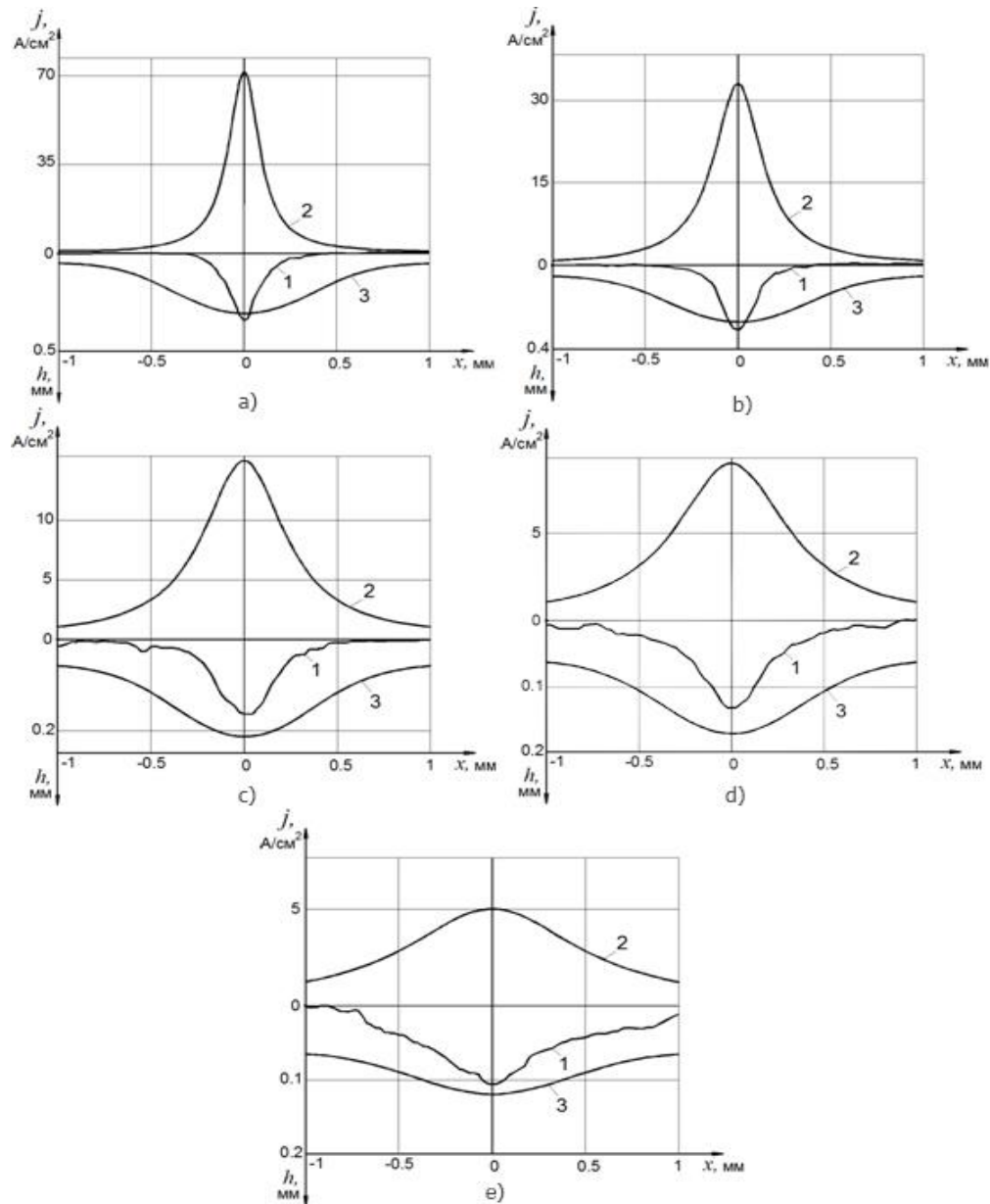


Рисунок 4.24 – Профіль експериментально отриманої канавки (крива 1), розподіл густини підведеного струму на поверхні анода (крива 2), теоретично розрахований профіль канавки (крива 3) для різних значень МЕР, мм: а) 0,05; б) 0,1; в) 0,2; г) 0,3; е) 0,5

Часовий проміжок 300 с (згідно з умовами експерименту) розбивався на проміжки з кроком 1 с. Для кожного моменту часу розраховувався отриманий профіль поверхні анода та перераховувався розподіл густини технологічного струму. Таким чином, було отримано динаміку перерозподілу підведеного струму в часі при зміні рельєфу поверхні анода в процесі електрохімі-

чного розчинення. В рамках застосованої математичної моделі не враховано вплив поляризаційних ефектів на поверхні анода та дифузійних змін у МЕР.

З точки зору керованості і відповідно до необхідних параметрів ЕХОДЕ, в кожному окремому технологічному випадку бажано отримати мінімально можливу зону розтікання струму по поверхні анода та максимально можливий градієнт залежності швидкості розчинення від відстані точок деталі до точок поверхні електрода. Відповідно, вищому рівню локалізації процесу відповідає технологічний випадок (рисунок 4.25), коли активне електрохімічне розчинення відбувається лише в зоні I, у зоні II воно мінімальне, а в зоні III – відсутнє. При цьому зони I та II повинні мати мінімально можливий розмір.

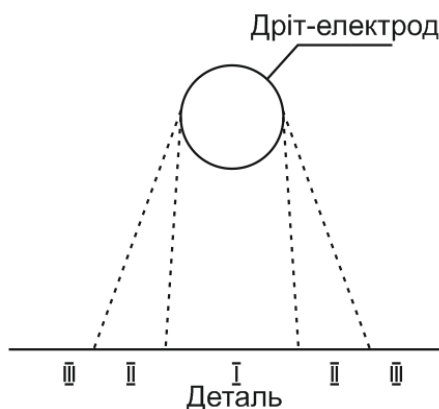


Рисунок 4.25 – Принципова схема оцінювання рівня локалізації процесу анодного розчинення за використання технологій ЕХОДЕ

Враховуючи сказане вище і зображені на рисунку 4.24 експериментальні та розрахункові дані, було висунуто гіпотезу про те, що для оцінювання впливу складу електроліту та АЧПДЖ на локальність процесу розчинення як критерії варто використовувати величину зони розчинення (ширину отриманої канавки, яка для кращої локалізації і керованості процесу має бути якомога меншою по ширині і більш глибокою) та порівняння «ексцесів» (Es) як показників гостровершинності розподілу густини струму по поверхні анода та розподілу активності розчинення по поверхні анода. Саме оцінювання

зміни (Es) дає змогу вичленити вплив конфігурації напруженості електричного поля в електрохімічній комірці з циліндричним електродом, яка обумовлена величиною МЕР і діаметром дроту, і, відповідно, шляхом порівняння результатів різних експериментів визначити вплив складу електроліту та АЧПДЖ на локальність процесу розчинення.

Для кількісного оцінювання електрохімічного процесу розчинення на поверхні анода скористаємося статистичним ймовірнісним підходом. Нехай елементарний акт відщеплення іона металу з поверхні анода є подією. Ознакою цієї події приймемо координату x місця, де відбулося відщеплення. Тоді сукупність подій може бути представлена у вигляді розподілу з кількісними ознаками, тобто за допомогою гістограми. Профіль експериментально отриманої канавки (крива 1, рисунок 4.24), який утворився внаслідок проходження сукупності елементарних подій розчинення, відтворює картину розподілу ознак подій, де координати x – їх місця проходження. Так, наприклад, максимальна глибина канавки під центром катода означає, що подій з ознакою $x = 0$ відбулося найбільше.

Обчислення значення ексцесу Es розподілу активності розчинення здійснюється за наступними формулами:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i h_i}{\sum h_i}, \quad (4.14)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot h_i}{\sum h_i}}, \quad (4.15)$$

$$\mu_4 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4 \cdot h_i}{\sum h_i}, \quad (4.16)$$

$$Es = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (4.17)$$

де h_i – глибина канавки в точці з координатою x_i , \bar{x} – середнє значення, σ – середнє квадратичне відхилення, μ_4 – центральний момент четвертого порядку.

Використовуючи наведений підхід, розраховано ексцеси експериментального профілю канавки, розподілу густини підведеного струму на поверхні анода і теоретично розрахованого профілю. Скориставшись можливостями графічних програм, визначено ширину отриманих канавок і за площами теоретичного та експериментального профілів канавки – коефіцієнт виходу за струмом. Отримані результати представлено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Параметри ЕХОДЕ, що визначають рівень локалізації процесу

МЕП, мм	Ексцес (E_s)			Коефіцієнт виходу за струмом	Ширина канавки, мм
	Розподіл густини струму на аноді в початковий момент	Експериментальний профіль канавки	Теоретично розрахований профіль канавки	Оцінка за площами теоретичного та експериментального профілів канавки	
0,05	4,156	6,615	-0,179	0,117	0,6
0,1	2,024	5,087	-0,307	0,239	0,95
0,2	0,564	2,933	-0,533	0,286	1,4
0,3	-0,032	0,412	-0,707	0,311	1,9
0,5	-0,56	-0,436	-0,931	0,477	2,1

Параметр E_s адекватно відображає реальні характеристики розподілу густини струму і характеристики отриманої геометрії канавки на аноді в початковий момент часу та добре корелює з шириною отриманих канавок для кожної величини МЕП. В усіх технологічних випадках для обраного електроліту та АЧПДЖ (електроліт – 6 % водний розчин NaCl, різниця потенціалів між електродами $\Delta\varphi = 4$ В, частота імпульсів $f = 1$ кГц, тривалість імпульсів струму $t = 300$ мкс) E_s експериментального профілю канавки є вищим за E_s розподілу густини струму на аноді. Таким чином, підтверджується гіпотеза про те, що можливо кількісно оцінити і, відповідно, вичленити вплив конфігурації напруженості електричного поля в електрохімічній комірниці з циліндричним електродом, яка обумовлена величиною МЕП і діаметром дроту. Як

результат, планово варіюючи електроліти та АЧПДЖ, за зміною величин E_s та ширини канавок можна визначити їх вплив на градієнт залежності швидкості розчинення від відстані точок деталі до точок поверхні електрода та на зону розтікання струму по поверхні, тобто на локальність процесу розчинення. Зростання локальності процесу розчинення підвищує керованість та ефективність згладжування мікронерівностей.

4.3.2 Розробка технологічної схеми подачі електроліту для електрохімічної обробки дротяним електродом і дослідження її ефективності

Важливою проблемою у багатьох дослідженнях ЕХРОДЕ є забезпечення рівномірності потоку електроліту. При обробці складних за конфігурацією поверхонь з'являються зони в міжелектродному проміжку, в яких електроліт рухається з різними швидкостями та має відмінні параметри зашламленості, газонаповненості, температури [175]. Все це є причиною неоднакової електропровідності міжелектродного середовища в окремих точках поверхні, яка обробляється, що призводить до втрати інформації про реальну продуктивність знімання матеріалу анода.

Суттєву нерівномірність швидкостей потоку електроліту і навіть зони турбулентності отримано при моделюванні розмірної електрохімічної обробки засобами COMSOL Multiphysics [44]. Поза увагою авторів залишився розподіл електростатичного поля. Водночас саме сукупність параметрів густини технологічного струму і швидкості оновлення електроліту визначають рівномірність проходження процесу анодного розчинення.

Необхідність спільного моделювання кількох фізичних процесів при електрохімічній обробці встановлено в роботі [39]. Розглянуто вплив швидкості електроліту на теплові поля та евакуацію бульбашок водню, що визначають рівномірність розчинення поверхні. Ці параметри є важливими для технологічної схеми виготовлення лопаток компресора. При використанні схеми плоский анод – циліндричний катод для шліфування поверхні у нашому випадку не застосовуються високі значення струму, які могли б призвести до

нагрівання електроліту. Тут важливішими є чинники нерівномірності розподілу електростатичного поля, зумовлені геометричною будовою електродів.

Зміна швидкостей течії в міжелектродному проміжку в ряді випадків знаходить відображення в структурі поверхні, що обробляється, наприклад у вигляді струменевості рельєфу та інших макродефектів [203]. Результати експериментальних досліджень, наведені в роботі [155], доводять, що в місцях звуження міжелектродного проміжку виникає критичний стан гідродинамічних умов потоку. Це, разом з концентрацією густини струму, призводить до значного пошкодження поверхні. Отже, виникає задача виявлення критичних місць електрохімічного розчинення при криволінійних поверхнях електродів ще на етапі проектування і вжиття заходів для уникнення таких ситуацій.

Існує ряд технологічних засобів, спрямованих на інтенсифікацію процесів оновлення властивостей міжелектродного середовища, що сприяє підвищенню точності обробки, наприклад вибір оптимальної форми і місця розташування електролітопідвідних каналів [175]. Для технологічної схеми електрохімічної обробки дотяним електродом (рисунок 4.26) використовується подача електроліту за допомогою сопла зверху деталі коаксіально дроту. Це найзручніший спосіб подачі електроліту з точки зору забезпечення відносної рівномірності потоку по всій висоті (до 100 мм) міжелектродного проміжку.

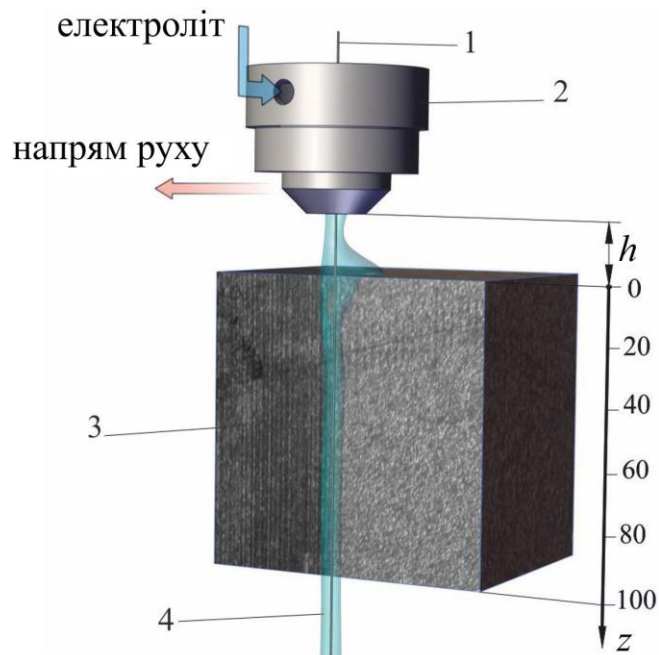


Рисунок 4.26 – Схема подачі електроліту в зону анодного розчинення при ЕХО дротяним електродом: 1 – дріт-катод; 2 – сопло; 3 – деталь-анод; 4 – струмінь електроліту

В роботі [38] показано, що оптимізація геометричних параметрів відповідних отворів для електроліту в кулеподібному катоді, виконана на основі чисельної моделі гідродинаміки, може значно покращити показники електрохімічної обробки.

Інший відомий спосіб уникнення складного нерівномірного руху потоку електроліту полягає в зниженні швидкості руху електроліту, аж до самопливу струменя під дією сили тяжіння. Однак наявність технологічного струму в малорухомому електроліті швидко призводить до дифузійних обмежень, зменшення концентрації реагуючих іонів і, як наслідок, призупинення анодного розчинення та порушення стабільності процесу. Тому ЕХРО в електроліті, який рухається з малою швидкістю (меншою 1 м/с), можлива тільки в поєднанні з обмеженням тривалості дії технологічного струму в імпульсі. Такий підхід дає можливість зменшити вплив течії електроліту на точність обробки.

Схема застосування комбінованої технології електроерозійного дротяного вирізання і подальшого електрохімічного полірування отриманої поверхні тим же дротяним електродом полягає в наступному. Чорновий електроерозійний різ, що застосовується з іскровими розрядами високої потужності для забезпечення максимальної продуктивності видалення матеріалу та швидкості різання, формує задану конфігурацію поверхні деталі. На цій стадії обробки деталь і дротяний електрод повністю занурені у робочу рідину (дистильовану воду або звичайну водопровідну воду) і додаткова рідина під значним тиском подається у вигляді струменів коаксіально дроту з верхнього і нижнього сопла з метою найбільш ефективної евакуації продуктів ерозії з прорізаного паза і оновлення стану міжелектродного проміжку. Далі вода зливається з ванни верстата і відпрацьовується друга стадія технологічного процесу – електрохімічне доведення поверхні. Електроліт подається з верхнього сопла з порівняно невеликим тиском у вигляді струменя, що обволікає дротяний електрод і заповнює міжелектродний проміжок по всій висоті деталі (рисунки 4.26).

Система числового програмного керування верстата забезпечує рух дротяного електрода вздовж траєкторії попереднього електроерозійного різання з еквідистантою i , таким чином, реалізується точне дотримання заданого міжелектродного проміжку протягом усієї стадії процесу поверхневого анодного розчинення. Вибираючи параметри електричних імпульсів, величину міжелектродного проміжку, швидкість руху електрода, користуючись розрахунком розподілу густини струму, можна досить точно керувати кількістю електричної енергії технологічного струму, підведеного до кожної ділянки поверхні. Швидкість електрохімічних реакцій на кожній ділянці визначається стабільністю і рівномірністю гідродинамічних умов руху електроліту, його оновлення та евакуації продуктів розчинення. Отже, виникає задача визначення вагомості чинників, які впливають на рівномірність струменя, і забезпечення стійкого однорідного поля швидкостей потоку в міжелектродному проміжку по висоті деталі.

Сопло має бути розраховано та сконструйовано таким чином, що забезпечує стабільність заданих гідродинамічних параметрів струменя робочої рідини на виході із сопла як для режимів електроерозійної, так і для електрохімічної стадій обробки.

4.3.2.1 Математичне моделювання та експериментальні дослідження параметрів струменя при його формуванні соплом подачі

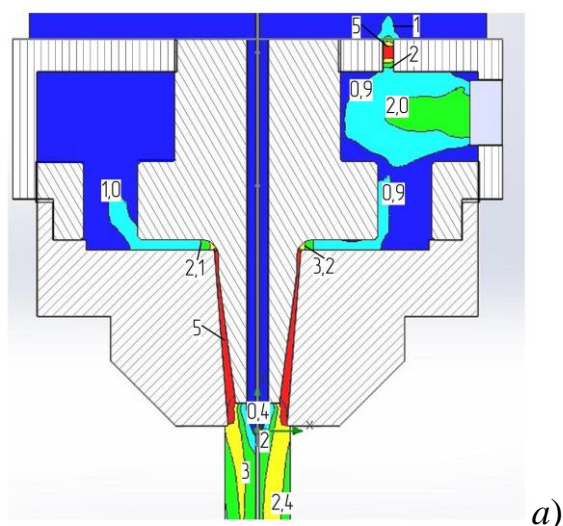
Моделювання проводилося на основі математичної моделі потоку електроду, описаної в пункті 2.3.5.

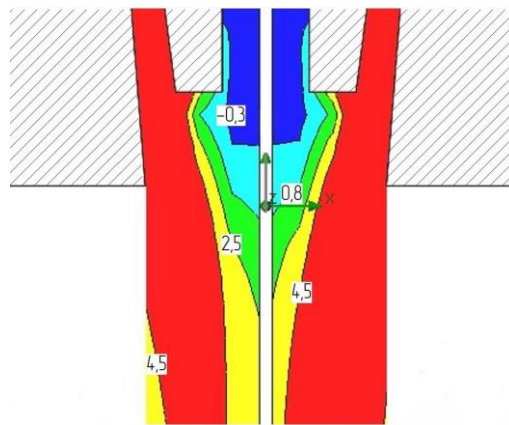
Моделювання гідродинамічних процесів всередині сопла здійснювалося з метою встановлення геометричних параметрів конструкції, які б гарантовано забезпечували дотримання потрібних режимів формування вихідного струменя для технологій ЕЕВОДЕ і ЕХРОДЕ, мали стійкість до можливих похибок виготовлення складових частин сопла та флуктуацій тиску робочої рідини на вході. Дослідження проводились у середовищі сучасних CFD програмних пакетів обчислювальної гідродинаміки.

Застосована математична модель стану текучого середовища всередині сопла базується на чисельному розв'язку системи рівнянь гідродинаміки для нестисливої ньютонівської рідини. Враховано ламінарні, турбулентні та перехідні режими шляхом усереднення за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса. Використовувався усереднений за малим масштабом часу вплив турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні часові зміни, усереднені за малим масштабом часу складових гідродинамічних параметрів потоку (тиску, швидкості), враховано шляхом введення в розгляд відповідних похідних за часом. В результаті в рівняннях з'явилися додаткові доданки – напруження за Рейнольдсом, і для замкнення цієї системи використано рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності та її дисипації в рамках k - ε моделі турбулентності, аналогічно [228]. Не враховано процеси тепломасопереносу за припущенням їх незначного впливу та кавітаційні явища через відсутність умов для їх виникнення в діапазоні значень досліджуваних параметрів. Фізи-

чні властивості рідини (в'язкість, густина тощо) задавалися рівними значенням фізичних властивостей водних розчинів електролітів NaNO_3 та NaCl 6-30 % концентрації при температурі 30-45 °С. Як граничні умови при проведенні чисельного експерименту задавався надлишковий тиск на вході сопла, на виході – тиск навколишнього середовища.

Візуальне представлення характерного розподілу тиску, отриманого в процесі розрахунку руху рідини, зображено на рисунку 4.27. Аналогічно отримано поля швидкостей рідини всередині сопла і на його виході. Аналіз результатів дає можливість виявити «критичні» місця конструкції з точки зору рівномірності руху рідини; забезпечити заданий режим виходу струменя із сопла зі зміною конструктивних параметрів та величини тиску на вході. Так, на виході з каналу подачі ДЕІ (рисунок 4.27, б) спостерігається область розрідження з тиском, меншим 101 325 Па. Це означає, що рідина зтягується по каналу подачі ДЕІ, тобто має місце явище інжекції. Кількісно його можна оцінити за витратою рідини по перерізу кільцевого каналу навколо ДЕІ. Саме таке значення витрати рідини повинен забезпечувати додатковий паз 4 (див. рисунок 2.4 пункту 2.1.5) для заповнення каналу з ДЕІ рідиною і запобігання зтягуванню повітря. Таким чином, отримано критерій для розрахунку геометричних параметрів додаткового паза залежно від вхідного тиску та конфігурації частин сопла, які створюють інжекційні процеси.





б)

Рисунок 4.27 – Візуалізація результатів чисельного моделювання руху рідини в соплі: а) внутрішня геометрія сопла, поле швидкостей, (м/с); б) область виходу струменя із сопла, розподіл надлишкового тиску, (кПа)

Проведено ряд розрахунків та встановлено значення площі поперечного перерізу додаткового каналу для різних конфігурацій внутрішньої будови сопла та вхідних тисків подачі електроліту, характерних для роботи системи в режимі ЕХРОДЕ.

Для перевірки отриманих даних та уточнення розрахункової моделі проведено серію експериментальних вимірювань. Додатковий паз 4 був перекритий, зверху на вхід каналу подачі ДЕІ герметично прикріплена забірня трубка, інший кінець якої занурений в окрему ємність з контрольованим об'ємом рідини. При подачі на вхід сопла рідини із заданим надлишковим тиском вимірювалися витрати рідини (шляхом зважування), що засмоктувалась через забірну трубку, та витрати рідини на виході із сопла. Розрахункові та експериментальні результати для конструкції сопла (рисунок 2.4 пункту 2.1.5) наведено в таблиці 4.5. Отримані розбіжності перебувають у межах допустимої інженерної точності.

Таблиця 4.5 – Порівняння розрахункових та експериментальних результатів

Характеристики		Числові значення				
Надлишковий тиск на вході, атм		0,2	0,3	0,4	0,45	0,5
Витрати на виході із сопла $Q_{\text{вих}}, \text{ л/хв}$	розрахунок	0,72	0,9	1,03	1,14	1,2
	експеримент	0,7	0,96	1,1	1,16	1,24
	похибка, %	+3	-6	-6,3	-2	-3
Витрати через додатковий канал $Q_{\text{паз}}, \text{ л/хв}$	розрахунок	0,014	0,016	0,022	0,027	0,029
	експеримент	0,016	0,017	0,024	0,029	0,031
	похибка, %	-12,5	-6	-8	-7	-6

Проведено ряд обчислювальних експериментів по виявленню місць у конструкції сопла, найбільш «чутливих», з точки зору збереження заданих гідродинамічних режимів, до похибок при виготовленні, з метою встановлення обґрунтованих вимог до точності в конструкторській документації.

Зокрема встановлено, що варіації шорсткості поверхні деталей сопла при розрахунках у рамках застосованої моделі не призвели до суттєвих змін у вихідних параметрах (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6 – Залежність витрат рідини від шорсткості поверхні деталей сопла

Надлишковий тиск на вході P , атм	0,2	0,3	0,4	0,45	0,5
Числові значення витрат, л/хв					
Ідеальна поверхня	0,72	0,9	1,03	1,14	1,2
Шорсткість $R_z=10 \text{ мкм}$	0,72	0,9	1,03	1,14	1,2
Шорсткість $R_z=20 \text{ мкм}$	0,73	0,91	1,03	1,15	1,2

Виконано комплекс перевірочних розрахунків гідравлічних характеристик роботи отриманої внутрішньої геометрії сопла на режимах підвищеного вхідного тиску, типових для експлуатації сопла при технології ЕЕВОДЕ, з метою встановлення точних гідродинамічних параметрів струменя рідини на виході із сопла, спрямованого в міжелектродний проміжок для видалення продуктів ерозії.

Проведено практичну апробацію сопла в процесі електроерозійної та електрохімічної обробки. При електроерозійній обробці спостерігалось ефективне видалення продуктів ерозії з міжелектродного проміжку, що забезпечило підвищення швидкості різання, а при наступній електрохімічній обробці отримано стабільний рівномірний струмінь електроліту навколо дротяного електрода по всій висоті деталі-анода, що, в свою чергу, позитивно вплинуло на якість фінішної поверхні деталі.

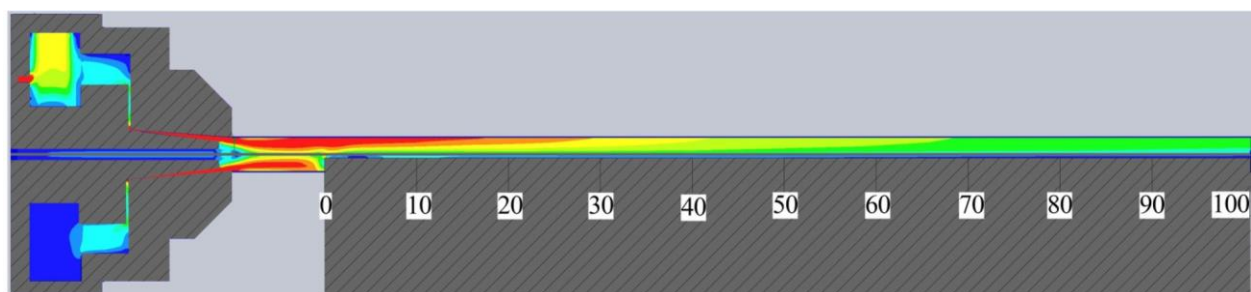
4.3.2.2 Гідродинамічні особливості потоку електроліту в міжелектродних проміжках, характерних для технології електрохімічної обробки дротяним електродом, та чинники, що на нього впливають

Проведено обчислювальні експерименти з варіацією технологічних параметрів процесу ЕХРО дротяним електродом при коаксіальній подачі струменя електроліту в МЕП за допомогою сопла.

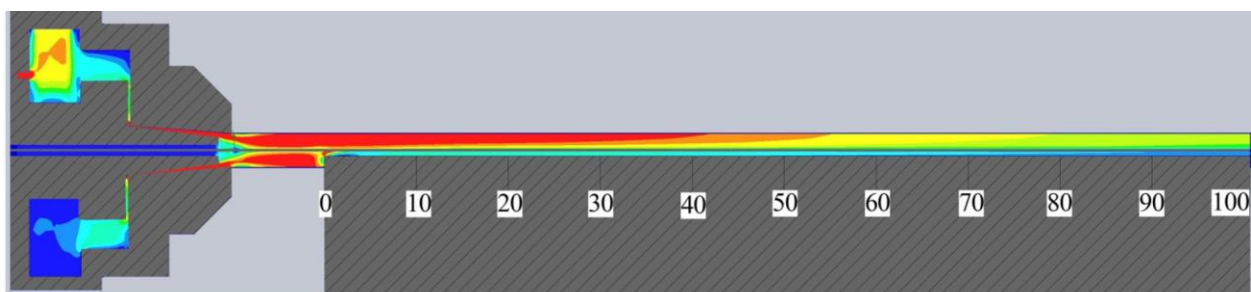
На рисунку 4.28 зображено розраховані поля швидкостей електроліту в поздовжньому перерізі струменя за тиску 0,4 атм на вході в сопло. При збільшенні МЕП (у цьому випадку від 0,3 мм до 0,5 мм) зміщується центр струменя, віддаляючись від анода, і дещо збільшується швидкість електроліту в струмені. Однак у прианодній зоні такі зміни менш помітні.

Важливим завданням є забезпечення рівномірної швидкості по всій висоті прианодної зони (0-100 мм). Найбільш проблемною є ділянка 0-20 мм на початку входження струменя в МЕП (рисунок 4.28, в). Швидкість тут нестабільна і суттєво відрізняється від середньої в прианодній зоні по висоті деталі. Очевидно, що на цій ділянці потоку електроліту буде формуватися най-

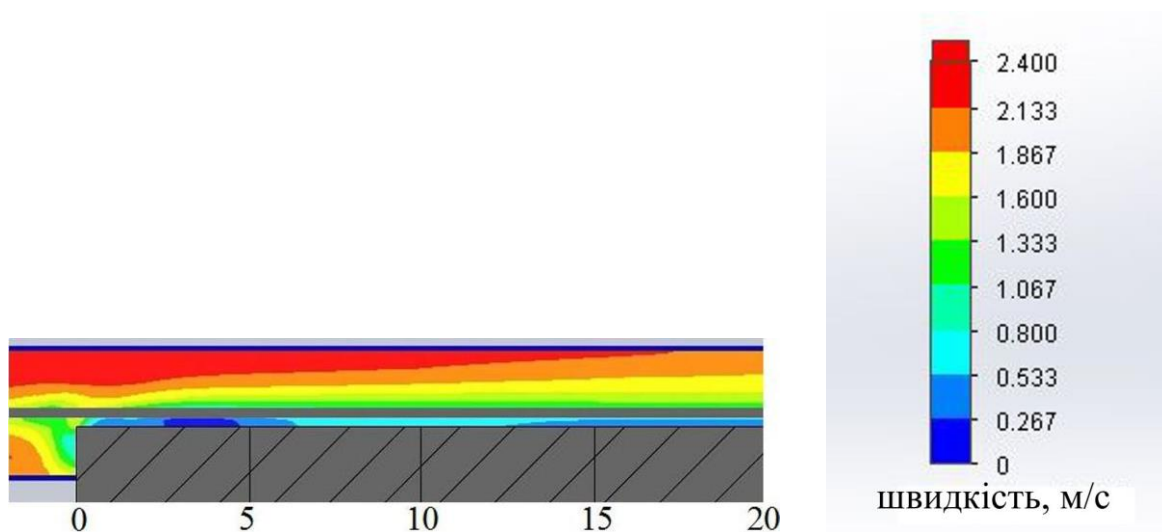
більш тонкий дифузійний шар, що є основним обмежуючим чинником при розрахунках допустимих тривалості та амплітуди імпульсів технологічного струму.



а)



б)



в)

Рисунок 4.28 – Поле швидкостей електроліту в поздовжньому перерізі струменя: а) за МЕР 0,3 мм; б) за МЕР 0,5 мм; в) зона 0-10-20 мм високого рівня нестабільності потоку

Для практичного проектування технологічних процесів ЕХРО дотримуючись електродом отримано кількісні залежності приповерхневої швидкості електроліту від величини надлишкового тиску на вході в сопло. На рисунку 4.29 наведено приклад результатів обчислень для вихідного отвору сопла діаметром 3,6 мм, МЕР – 0,5 мм, відстань від сопла до деталі $h = 5$ мм. На ділянці поверхні анода на висоті $z = 10-100$ мм маємо рівномірне зростання швидкості електроліту зі збільшенням тиску. Природно, що внизу ділянки швидкість менша, ніж зверху при тому самому значенні тиску. Так, у цьому прикладі, при тиску 0,8 атм швидкість у верхній зоні становить 1,6 м/с, далі спадає і в нижній зоні становить 0,97 м/с. Іншу картину спостерігаємо на ділянці висоти $z = 0 - 10$ мм (зверху анода на вході в МЕР). Характер розподілу швидкостей руху електроліту тут визначає зона дестабілізації потоку (рисунки 4.29, б). Рівномірне збільшення швидкості зі зростанням тиску починається тільки при $z > 4$ мм.

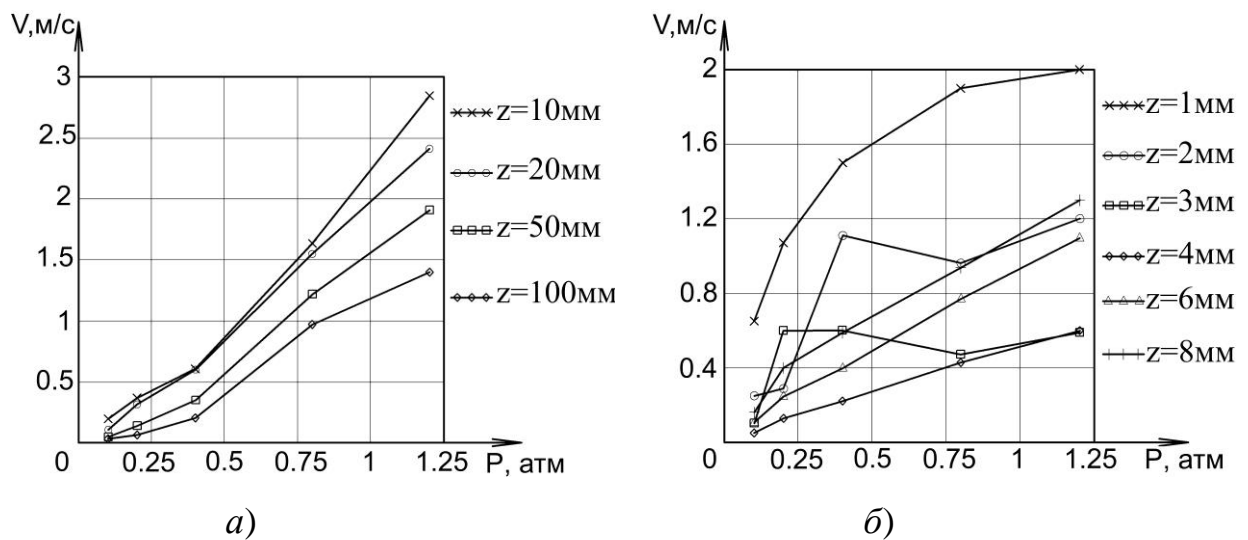


Рисунок 4.29 – Залежність швидкості електроліту від надлишкового тиску в соплі: а) вздовж усієї висоти деталі; б) в зоні збурення потоку

На рисунку 4.30 зображено розрахункові дані для встановлення впливу відстані від сопла до деталі на швидкість електроліту в МЕР. У цьому прикладі прийнято тиск 0,4 атм, МЕР 0,5 мм, діаметр сопла 3,6 мм. На відстані

1 мм від сопла до деталі швидкість електроліту у верхній зоні анода приблизно в п'ять разів більша, ніж у нижній частині. На відстані до деталі 5 мм і більше різниця в швидкостях по висоті анода не така суттєва. Проведені розрахунки для інших значень МЕР, вхідного тиску, діаметра сопла дають дещо інші конкретні значення швидкостей, але не змінюють загальну тенденцію.

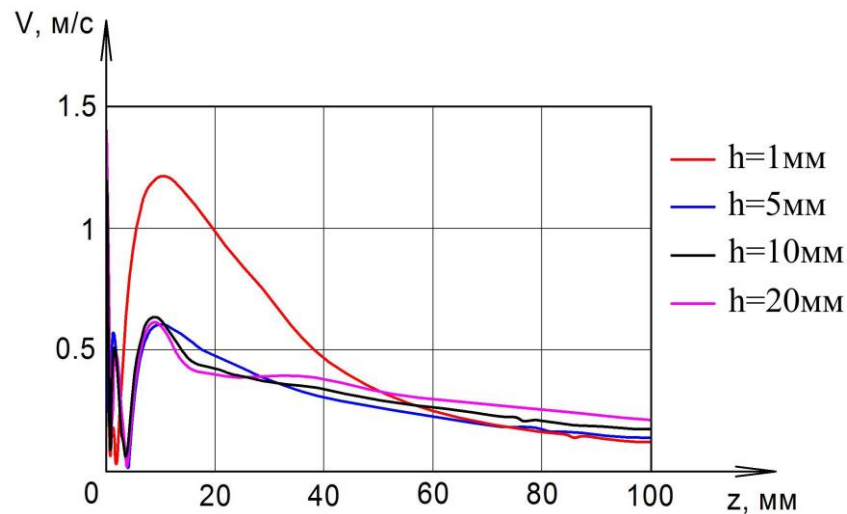


Рисунок 4.30 – Динаміка зміни швидкості електроліту в приповерхневій зоні по висоті деталі при різних висоті розміщення сопла

Отже, для практичного використання доцільно надати наступні рекомендації. При обробці деталей товщиною 20 – 100 мм краще вибрати відстань від сопла до деталі понад 5 мм, при цьому подальше збільшення відстані не призводить до суттєвих змін швидкості електроліту в МЕР. Це забезпечить прийнятну рівномірність швидкості електроліту по всій висоті обробки. Для тонких деталей товщиною до 20 мм краще вибрати невелику відстань від сопла до деталі (до 1 мм). Це забезпечить підвищену швидкість електроліту в зоні обробки.

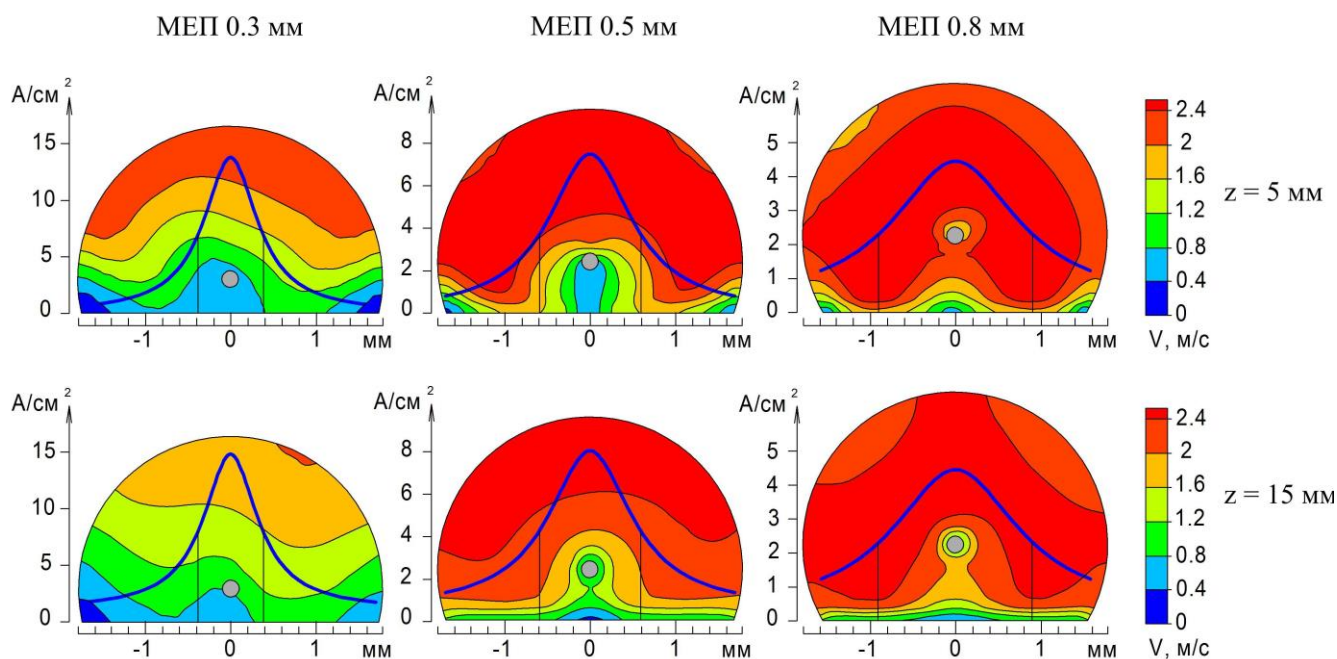
4.3.2.3 Узгодження гідравлічних та електричних параметрів електрохімічної обробки для зменшення нерівномірності розчинення по висоті деталі та підвищення точності формоутворення

На рисунку 4.31 зображено результати розрахунку полів швидкостей у поперечному перерізі струменя, систематизованих по висоті анода z (горизонтальні рядки) та величині МЕП (вертикальні стовпчики). На поля швидкостей накладені з дотриманням масштабу графіки (синя крива) первинного розподілу густини струму на поверхні анода, розраховані аналітично за допомогою методу конформних відображень теорії функцій комплексного змінного (пункт 2.3.2). Таке суміщення отриманих даних дає можливість оцінити рівень локалізації дії технологічного струму залежно від розподілу підведеного електростатичного поля і місцевої швидкості оновлення електроліту. Це забезпечує стабільність, прогнозованість та рівномірність швидкості розчинення на різних ділянках анода. Вертикальними лініями обмежена анодна зона інтенсивної напруженості електричного поля, що відповідає 0,5-1 максимального значення густини струму при постійній провідності електроліту. Провідність електроліту не є сталою, а зменшується зі зменшенням швидкості оновлення в приповерхневих шарах. Тому можна констатувати факт виникнення умов для зменшення локалізації розчинення при МЕП 0,5-0,8 мм на висоті $z = 5$ мм, де спостерігаємо кілька ділянок з різною швидкістю електроліту. Причому в центрі, точно навпроти дротяного катода, де напруженість максимальна, швидкість потоку електроліту в кілька разів менша, ніж на периферії.

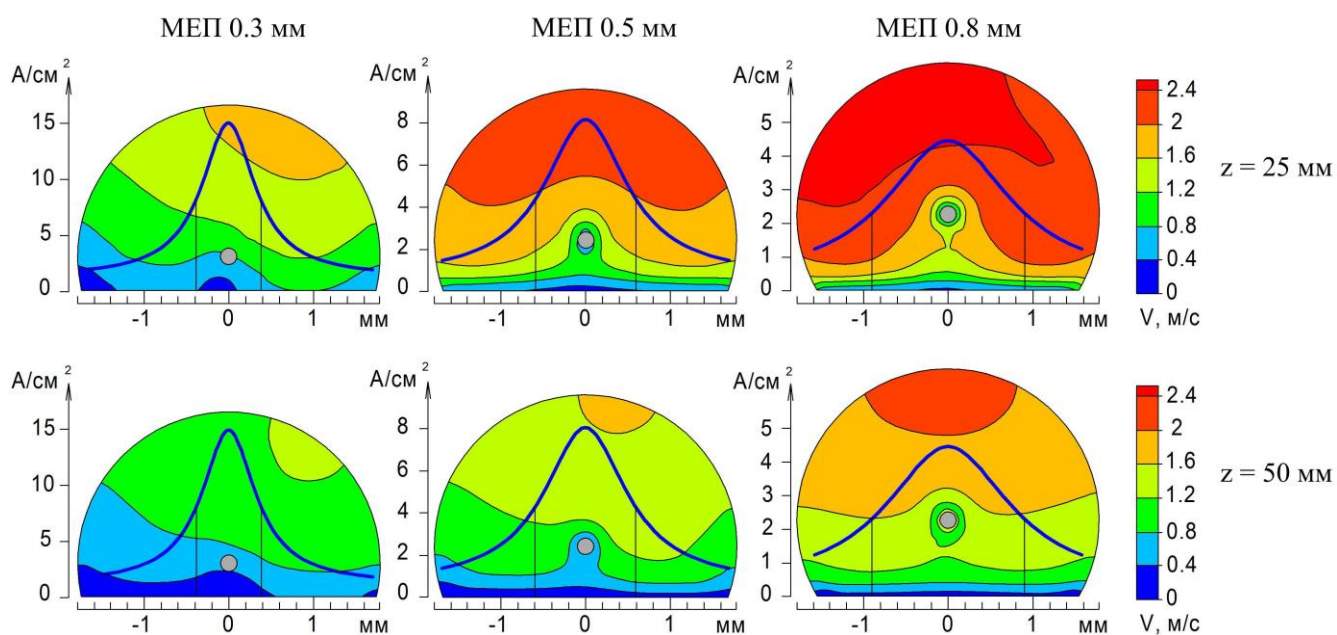
При $z = 15 - 50$ мм швидкість поступово вирівнюється, хоча й зменшується. При МЕП 0,3 мм у зоні інтенсивного розчинення не спостерігається значної різноманітності швидкостей і також вниз по аноду вона зменшується. Такі результати свідчать про те, що розчинення у верхній частині анода буде йти інтенсивніше.

На основі проведених обчислювальних експериментів встановлено, що можна мінімізувати різницю в швидкостях електроліту зверху і знизу по висоті струменя, зменшивши загальну швидкість електроліту шляхом вибору низького тиску на вході в сопло. Повільний рух електроліту призводить до необхідності обмежень подачі електричної енергії в МЕП і втрати продукти-

вності електрохімічного розчинення. Задачі ЕХРО дрітним електродом полягають у згладжуванні поверхні та видаленні зони термічного впливу шляхом розчинення тонких поверхневих шарів. Зважаючи на це, показником продуктивності доцільно поступитися на користь точного дотримання товщини знятого шару по всій висоті анода.



a)



б)

Рисунок 4.31 – Поля швидкостей потоку електроліту в поперечному перерізі струменя та розподіл густини струму по поверхні анода: *a)* на висоті 0-20 мм; *б)* на висоті 20-100 мм

У ході проведених досліджень використано точний, аналітично представлений розподіл густини струму на поверхні анода та картину розподілу швидкостей потоку електроліту. Це дає можливість для кожного конкретного випадку висоти деталі, величини МЕР, параметрів подачі електроліту проектувати амплітудно-часові параметри імпульсів струму для дозованого підведення електричної енергії в зону обробки. Основні керівні принципи викладено багатьма дослідниками раніше [64, 209]. Згідно з існуючими теоретичними уявленнями і рядом експериментальних даних при обробці більшості металів і сплавів шорсткість поверхні зменшується зі збільшенням густини струму. Також шорсткість поверхні стає нижчою при зменшенні величини міжелектродного проміжку. Це можна пояснити інтенсивністю фізико-хімічних процесів і значним впливом МЕР на величину густини струму в западині і на виступі мікропрофілю. Застосування імпульсних режимів обробки дає можливість періодичного відновлення вихідних властивостей електроліту в міжелектродному проміжку за час паузи між імпульсами, що знижує вимоги до гідродинамічних параметрів потоку електроліту.

Будемо дотримуватись теоретично обґрунтованої і практично випробуваної методики вибору амплітудно-часових параметрів імпульсів струму [15, 201]. Тоді максимально допустима величина його густини i_p визначається дифузійними обмеженнями і обраховується відносно гранично допустимого постійного струму i_{lim} :

$$i_p/i_{\text{lim}} = \left[\delta_p / \delta (1 - \gamma_a) + \gamma_a \right]^{-1}, \quad (4.18)$$

де δ_p – товщина пульсуючого дифузійного шару; δ – товщина пограничного шару при застосуванні постійного струму; γ_a – сквапність, тобто відношення

часу тривалості робочого імпульсу t_{on} до повного періоду. Визначення i_{lim} для конкретних матеріалу анода та складу електроліту є окремою задачею. Вирішується вона краще експериментально для плоских електродів і ламінарного потоку електроліту за максимальними показниками виходу за струмом.

Для гальваностатичного режиму

$$\delta_p = 2\sqrt{Dt_{on}/\pi}, \quad (4.19)$$

де D – коефіцієнт молекулярної дифузії. Час тривалості імпульсу t_{on} не повинен перевищувати перехідний час τ , в кінці якого концентрація реагуючих іонів у дифузійному шарі падає до нуля.

На основі розв'язку рівняння дифузії Фіка

$$\tau = \pi \left((nF)^2 C_b^2 D \right) / 4i_p^2, \quad (4.20)$$

де n – кількість перенесених електронів (зарядове число реагуючого елемента); F – константа Фарадея; C_b – об'ємна (вихідна) концентрація електроліту.

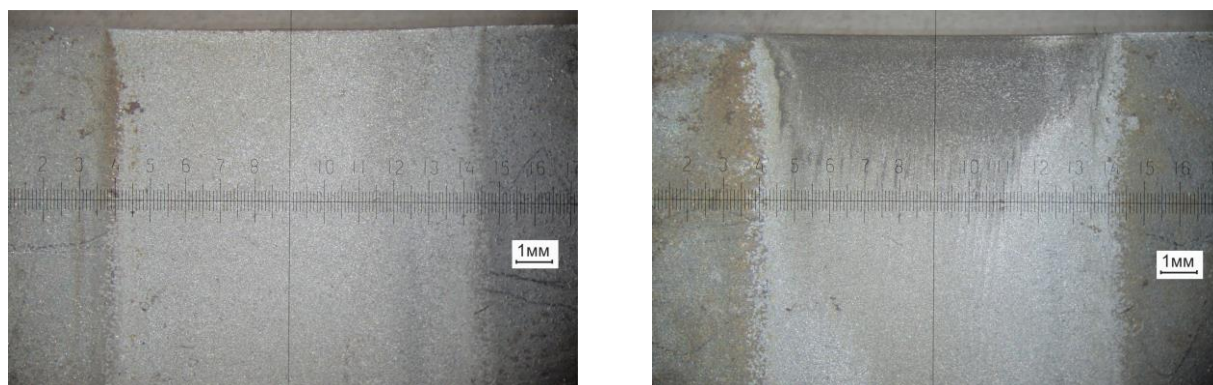
Урахування впливу швидкості руху електроліту v на дифузійні процеси, зокрема на товщину дифузійного шару, наведено в [209] при розгляді задачі про обтічний електрод:

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt{vH/v} (D/v)^{1/3}, \quad (4.21)$$

де v – кінематична в'язкість електроліту, H – відстань до точки початку набігання потоку на електрод. Тобто конвекція електроліту має подвійний вплив: вона вирівнює концентрацію в об'ємі рідини і впливає на дифузійний перенос, визначаючи товщину дифузійного шару. Для першого ефекту достатньо невеликої конвекції, але другий ефект кількісно пов'язаний зі швидкістю конвективного потоку: чим вища ця швидкість, тим тоншим буде дифузійний шар, і тим більші градієнти концентрації та дифузійні потоки.

Уточнити результати розрахунків допомагають проведені експериментальні дослідження (рисунок 4.32). Як анод слугувала плоска пластина висотою 44 мм зі штампової сталі X12Ф1, катод – латунний дріт діаметром 0,2 мм (ДКРПМ ФКТЛ63), електроліт – 1 М водний розчин NaCl при температурі

30-32,5 °С. Величина МЕРП варіювалася в межах 0,3-0,8 мм. Амплітуда імпульсів струму гальваностатичного режиму підбиралася таким чином, що забезпечувалась густина струму в межах, зображених на рисунку 4.31.



а)

б)

Рисунок 4.32 – Фотографія ділянки на поверхні анода після проходу ЕХО дротяним електродом: *а)* при розрахованих параметрах імпульсів струму; *б)* при відхиленні від розрахованих значень параметрів імпульсів струму

Так, при виборі параметрів імпульсного струму, розрахованих відповідно до швидкості електроліту згідно з (4.18)–(4.21), отримуємо рівномірно розчинений шар з низькою шорсткістю сформованої поверхні (рисунок 4.32, *а*). При відхиленні від розрахованих параметрів у бік збільшення підведеної енергії спостерігається порушення нормального процесу розчинення у верхній частині анода, в зоні нестабільності потоку електроліту. Очевидно, надлишкова енергія викликає супутні небажані хімічні реакції, спостерігається смугасте розчинення (рисунок 4.32, *б*).

4.3.3 Обґрунтування вибору амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів для ефективної електрохімічної обробки дротяним електродом

Потужним ресурсом у керуванні процесами електрохімічного розчинення є можливість варіювання амплітудно-частотними параметрами імпульсного технологічного струму. Дозованість підведення енергії до електродів

дає можливість застосовувати імпульсну електрохімічну обробку для виготовлення мікророзмірних деталей, де необхідні висока точність і керованість процесу.

Правильний вибір амплітудно-часових параметрів імпульсного струму при практичному застосуванні електрохімічного фінішування поверхні дає значний ефект. Так, електрополірування трубчастої поверхні сталі SS316 в електроліті NaCl/NaNO₃ протягом 45 с покращило шорсткість поверхні з Ra = 1 мкм до дзеркального вигляду з фіналом Ra = 0,026 мкм [177]. Експериментальні дослідження при фінішуванні деталей із підшипникової сталі GCr15 в суміші розчинів NaCl і NaNO₃ дали можливість підібрати такі режими імпульсного струму, що забезпечили покращення шорсткості поверхні з Ra = 1,6 мкм до Ra = 0,12 мкм [205].

Кількісне моделювання при імпульсній електрохімічній мікрообробці проводять на основі заміщення міжелектродного проміжку еквівалентними електричними схемами [83] або на основі розв'язку системи диференціальних рівнянь масопереносу в електричному полі заряджених реагуючих іонів та рівняння Пуассона для електростатичного потенціалу поля з урахуванням відповідних початкових і граничних умов [88]. Однак для технологічної схеми дротяний циліндричний катод – плоский анод такі математичні моделі не адаптовані.

Тому в дисертаційній роботі вирішується задача, яка полягає в розробці математичної моделі та проведенні її експериментальної апробації для обґрунтованого вибору амплітудно-часових параметрів імпульсного струму, що забезпечить ефективність процесу анодного розчинення при комбінованій технології електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

4.3.3.1 Теоретичні дослідження обмежуючих чинників при виборі амплітудно-часових параметрів прямокутних імпульсів струму за гальваностатичного режиму ЕХРО

Електрохімічна обробка є певним типом електролізу з дією електричного струму, що проходить через електроліт у гальванічному елементі. Деталь, що обробляється, служить анодом. Струм, що подається ззовні, проходить від анода до катода, приводить до видалення поверхневих шарів металу, які розчиняються в електроліті, стають катіонами і прямують до катода. При електрохімічній обробці використовують такі електроліти, матеріали анода (переважно сталі) та катода (латуні), катіони яких не осідають на поверхні катода. Таким підбором забезпечується основна перевага ЕХО – незмінність форми електрода-інструменту [240]. Кількість видаленого металу залежить від розчину електроліту, температури, густини струму і електрохімічного еквіваленту матеріалу заготовки. Зазвичай амплітуда струму і час – дві керовані змінні для здійснення контрольованого перебігу процесу і досягнення необхідних показників поверхні деталі. Граничні обмеження керованості цих змінних пов'язані з механізмами процесів, які відбуваються на поверхні металу при ЕХО (рисунок 4.32). Вважається [198], що інтенсивність анодного розчинення може бути обмежена масопереносом, а саме дифузією іонів металу, що розчиняються, акцепторних компонентів з електроліту та молекул води. На поверхні анода утворюється компактно-пориста соляна плівка. Причому, утворення компактного сольового шару товщиною близько 10 нм відбувається переважно на дні впадин, і рух іонів у ньому здійснюється завдяки наявності високого електричного поля. Цей шар має великий опір через низьку рухомість іонів у твердому стані. Далі знаходиться пористий шар плівки, товщиною близько кількох мікронів, заповнений електролітом, насиченим іонами металів, що розчинилися. В сукупності ці компактно-пористі шари становлять адсорбційний подвійний шар (рисунок 4.32). Густина струму контролюється підходом акцепторних іонів до поверхні шару, тобто процесами масопереносу в дифузійному шарі, який розташований далі. Катіони металу, що виділяються і адсорбуються на поверхні подвійного шару, видаляються (сольватуються) акцепторними іонами, які дифундують до поверхні. В стаціонарному стані дії електричного поля концентрація акцепторних іонів

у дифузійному шарі менша, ніж в об'ємі електроліту і на межі електрод/електроліт набуває значення, близького до нуля, якщо іони споживаються, як тільки доходять до поверхні. Концентрація катіонів металу, навпаки, зростає, відбувається блокування поверхні цими адсорбованими іонами, що призводить до виникнення надпотенціалу перенапруження. Це, в свою чергу, ініціює сторонні хімічні реакції, що споживають частину кількості витраченої електрики, і ефективність основного процесу розчинення падає, змінюється якість обробленої поверхні.

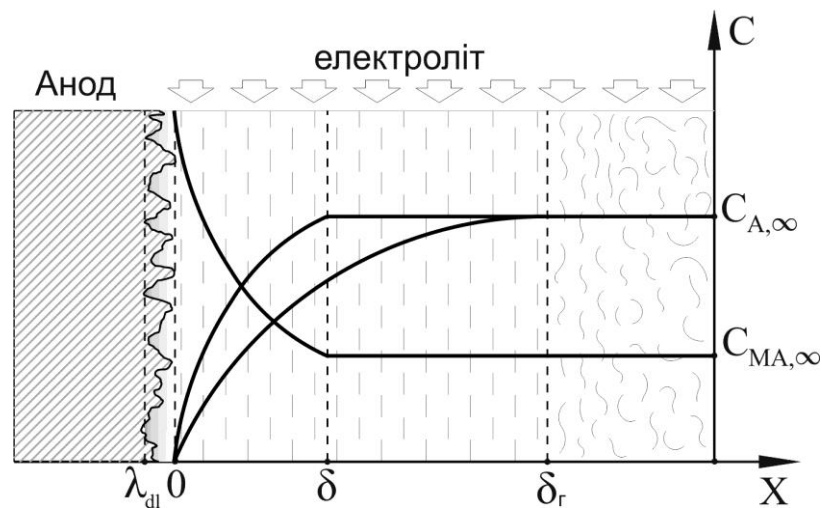


Рисунок 4.32 – Розподіл концентрації акцепторних іонів C_A і адсорбованих іонів металу C_{MA} в електроліті біля поверхні анода: λ_{dl} – товщина адсорбційного подвійного шару, δ – товщина дифузійного шару, δ_Γ – товщина гідродинамічного пограничного шару [198]

Місцева густина струму на аноді, яка залежить від значення амплітуди імпульсів струму, є дуже важливим параметром для контролю за процесом розчинення. Для конфігурації циліндричний дротяний катод – плоский анод такий розподіл описується аналітичними формулами. При поверхневій обробці підбирають такий склад і концентрацію електролітів, щоб досягти більшої густини струму на виступах порівняно з впадинами і вирівнювання поверхні завдяки переважному розчиненню виступів. Важливим завданням є забезпечення достатньої густини струму для рухомості іонів у в'язкому адсор-

бційному подвійному шарі. Однак збільшення амплітуди струму спричиняє необхідність скорочувати час дії імпульсу через більш швидке виникнення дифузійних обмежень. Тому кількісні моделі розподілу густини струму і дифузійних процесів у МЕР є дієвим інструментом для керування процесами поверхневого анодного розчинення.

Математична модель базується на розв'язку нестационарної задачі дифузії в приелектродній області (рисунок 4.32), який описує коливання концентрації $C(x,t)$ реагуючих іонів в електроліті внаслідок дії періодичного струму. Для двокомпонентних електролітів типу NaCl , NaNO_3 розглядаються $C_1(x,t)$ – концентрація натрію (катіони), $C_2(x,t)$ – концентрація хлору (аніони) та D_1 , D_2 – коефіцієнти дифузії, відповідно, натрію і хлору.

Порядок побудови математичної моделі відбувається на основі загальної математичної моделі пункту 2.3.6 зі змінами, що відповідають конкретній формі технологічних імпульсів струму (рисунок 4.33) для випадку, що досліджується.

Приймемо наступні спрощення: розчин електроліту має достатньо інертні іони солі, тому потоком міграції іонів внаслідок дії електричного поля можна знехтувати; фізичні параметри електроліту постійні; дія сил тяжіння в області дифузії незначна; в об'ємі електроліту не відбуваються хімічні реакції. Період імпульсів повинен бути довшим, ніж час зарядки-розрядки подвійного електричного шару, який зазвичай триває кілька мікросекунд. За таких умов рівняння дифузії має вигляд [15]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C = D \nabla^2 C. \quad (4.23)$$

Початкові та граничні умови:

$$\begin{aligned} C &= C_{\infty} \text{ при } t=0; \\ C &= C_{\infty} \text{ при } x \rightarrow \infty; \\ \frac{\partial C}{\partial x} &= \frac{i(t)}{nFD} \text{ при } x=0; \end{aligned} \quad (4.24)$$

де D – коефіцієнт дифузії іонного компонента, \vec{v} – швидкість електроліту, C_∞ – значення концентрації далеко від електрода (в об'ємі електроліту), n – кількість електронів, які перенесені в електродній реакції, $F = 9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль – число Фарадея.

Для малих періодів імпульсів струму в тонких приелектродних шарах, які знаходяться всередині гідродинамічного пограничного шару (рисунк 4.32), внесок конвективної складової $\vec{v} \cdot \vec{\nabla} C$ незначний [15]. Тому рівняння (4.23) можна спростити:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C. \quad (4.25)$$

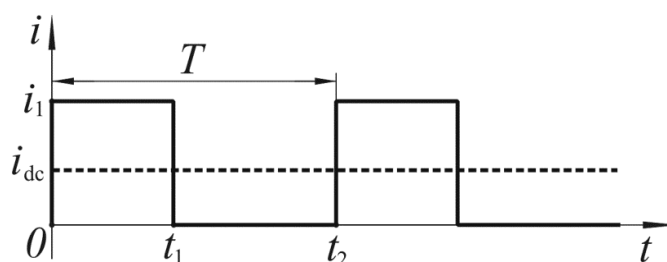


Рисунок 4.33 – Форма технологічних імпульсів струму $i(t)$ за ЕХРО

Представимо імпульсний струм (рисунк 4.33), який проходить через поверхню розділу електрод/електроліт, у вигляді суми усередненої за часом постійної складової i_{dc} і змінної складової коливального струму i_{ac} :

$$i(t) = i_{dc} + i_{ac}(t), \quad (4.26)$$

тут середня постійна густина струму

$$i_{dc} = \frac{i_1 t_1}{T}. \quad (4.27)$$

Змінна густина струму на двох ділянках

$$i_{ac}(t) = \begin{cases} i_1 - i_{dc} & \text{при } 0 < t < t_1, \\ -i_{dc} & \text{при } t_1 < t < t_2. \end{cases} \quad (4.28)$$

Аналогічно можна розкласти концентрацію

$$C(x,t) = \bar{C}(x) + C(x,t), \quad (4.29)$$

де $\bar{C}(x)$ – стала концентрація, що встановилася, $C(x,t)$ – змінна концентрація.

За умови (4.29) із рівнянь (4.24), (4.25) одержимо два рівняння для $\bar{C}(x)$ та $C(x,t)$ з відповідними граничними та початковою умовами.

Рівняння для $\bar{C}(x)$

$$\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} = 0, \quad (4.30)$$

за умов:

$$\bar{C} = C_\infty \text{ при } x \geq \delta, \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = -\frac{i_{dc}}{nFD} \text{ при } x = 0. \quad (4.32)$$

Розв'язком рівняння (4.16) буде

$$\bar{C}(x) = C_1 x + C_2,$$

де C_1, C_2 – сталі інтегрування. Задовольнивши умови (4.31) і (4.32), отримаємо:

$$C_1 = -\frac{i_{dc}}{nFD}, \quad C_2 = C_\infty + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta. \quad (4.33)$$

Тому розв'язок рівняння (4.30) набуде наступного вигляду:

$$\bar{C}(x) = -\frac{i_{dc}}{nFD} x + C_\infty + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta. \quad (4.34)$$

Знайдемо $\bar{C} \Big|_{x=0} = C_\infty + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta$. У граничному випадку при $i_{dc} = i_{\lim}$ бу-

де $0 = C_\infty + \frac{i_{\lim}}{nFD} \delta$, звідки

$$i_{\lim} = -\frac{nFDC_\infty}{\delta} \quad (4.35)$$

– обмежуюча величина густини постійного струму [198].

Для коливальної частини концентрації $C(x,t)$ отримуємо рівняння:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (4.36)$$

з умовами:

$$\begin{aligned} C &= 0 \text{ при } x = \delta, \\ C &= 0 \text{ при } t = 0, \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{i_{ac}(t)}{nDF} \text{ при } x = 0.$$

Задача (4.36), (4.37) розв'язується з використанням перетворення Лапласа [15, 17]. Поверхнева змінна концентрація

$$C_s(t) = -\frac{1}{nF} \int_0^t Y(t-u) \cdot i_{ac}(u) du, \quad (4.38)$$

$$\text{де } Y(t) = \frac{2}{\delta} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{\pi^2 D}{\delta^2} (m-\frac{1}{2})^2 t}.$$

Введемо безрозмірні величини:

$$\begin{aligned} C^* &= \frac{C}{C_{\infty}}, \quad C_s^* = \frac{C_s}{C_{\infty}}, \quad \overline{C_s^*} = \frac{\overline{C_s}}{C_{\infty}}, \quad C_s^* = \frac{C_s}{C_{\infty}}, \quad t^* = \frac{t}{T}, \quad T^* = \frac{DT}{\delta^2}, \\ \theta_1 &= \frac{t_1 - 0}{T}, \quad \theta_2 = \frac{t_2 - t_1}{T}, \quad i_{PL}^* = \frac{i_{PL}}{i_{lim}}, \quad i_1^* = \frac{i_1}{i_{lim}}, \quad i_{ac}^* = \frac{i_{ac}}{i_{lim}}, \quad i_{dc}^* = \frac{i_{dc}}{i_{lim}}, \end{aligned} \quad (4.39)$$

де θ – сквапність, i_{PL} – гранично допустима густина струму, при якій поверхнева концентрація $C_s = 0$. Тоді згідно з (4.29) повна безрозмірна поверхнева концентрація

$$C_s^* = 1 - i_{dc}^* - \frac{1}{nFC_{\infty}} \int_0^{t^*} Y(t^* - u) \cdot i_{ac}(u) du. \quad (4.40)$$

Формула (4.28) свідчить, що C_s^* зменшується за рахунок середнього струму i_{dc} та змінного струму $i_{ac}(t)$. У формулі (4.40) згідно з (4.28) $i_{ac}(t)$ – стала для кожної ділянки (рисунок 4.33), тому обрахунок інтегралу слід вести по ділянках. Отримаємо Ψ_1, Ψ_2 значення інтегралу по ділянках:

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= 2T^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \left\{ \left[1 - e^{-\lambda_m t_1^*} \right] \right\} \text{ при } 0 < t^* < t_1^*, \\ \Psi_2 &= 2T^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \left\{ \left[1 - e^{-\lambda_m t_2^*} \right] - \left[1 - e^{-\lambda_m t_1^*} \right] \right\} \text{ при } t_1^* < t^* < t_2^*,\end{aligned}\quad (4.41)$$

$$\text{тут } \lambda_m = \pi^2 T^* \left(m - \frac{1}{2} \right)^2.$$

При малих значеннях T власні числа λ_m набуватимуть малих значень і ряди у формулах (4.41) будуть збігатися повільно. Щоб спростити (4.41), ви-несемо за знак Σ параметри, що не залежать від m , та врахуємо, що

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \frac{\pi^2}{8}. \text{ Отримаємо:}$$

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= 1 - \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(m - \frac{1}{2} \right)^2} e^{-\lambda_m t_1^*}, \\ \Psi_2 &= \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(m - \frac{1}{2} \right)^2} \left(e^{-\lambda_m t_1^*} - e^{-\lambda_m t_2^*} \right).\end{aligned}\quad (4.42)$$

Загальна безрозмірна поверхнева концентрація набуде вигляду:

$$C_s^* = 1 - \frac{i_{dc}}{i_{lim}} - \left(\frac{i_1 - i_{dc}}{i_{lim}} \Psi_1 + \frac{i_{dc}}{i_{lim}} \Psi_2 \right). \quad (4.43)$$

Прирівняємо до нуля C_s^* у формулі (4.43) та знайдемо допустиму густину струму $i_{PL} = i$ при $C_s^* = 0$ та при $t^* = t_1^*, t_2^*$, тобто в кінці кожної ділянки [15, 17].

Для прямокутного імпульсу (рисунок 4.33), де навантажена перша ділянка, отримаємо

$$i_{PL} = \frac{i_{lim}}{\theta_1 + (1 - \theta_1) \Psi_1}. \quad (4.44)$$

Для ефективної обробки з максимальним значенням коефіцієнта виходу за струмом необхідне виконання умови

$$i_{max} \approx i_{PL}, \quad (4.45)$$

де i_{\max} – максимальне значення густини струму на поверхні деталі для конкретної конфігурації електродів технологічної схеми ЕХРО. У нашому випадку – це циліндричний дротяний катод і плоский анод, для яких розподіл напруженості електричного поля і густини струму обраховується за аналітичними формулами [124, 217, 232].

Вимогу (4.45) можна задовольнити, змінюючи технологічні параметри – напругу на електродах, величину міжелектродного проміжку, діаметр д्रो-тяного електрода, концентрацію електроліту, а також за рахунок вибору t_1 , T , розв'язавши рівняння (4.44) відносно θ_1 .

4.3.3.2 Експериментальні дослідження ефективності анодного розчинення в технологічних схемах з нерухомим та рухомим дротяним катодом

Для узгодження розрахункової моделі з реальним технологічним процесом електрохімічної обробки дротяним електродом проведено серії експериментів. Використовувались дві технологічні схеми: з нерухомим електро-дом (рисунк 4.34) – в результаті розчинення утворювалась вертикальна канавка на поверхні деталі, і з рухомим електродом (рисунк 4.35) – відбувалося розчинення поверхневого шару деталі певної товщини.

Експерименти електрохімічної обробки поверхні деталі висотою 11,5 мм (матеріал заготовки – штампова сталь Х12Ф1) проводилися в середовищі електроліту 1 М NaCl при температурі 37 – 42 °С. Як катод використовувався латунний дріт (ДКРПМ ФКТЛ63) діаметром 0,2 мм. Величина міжелектродного зазору варіювалась в межах 0,2 – 0,4 мм; напруга, підведена в міжелектродний проміжок, вибиралася в межах 4-12 В; тривалість електричних імпульсів становила 0,2 – 5 мс, сквапність – 20 – 50 %, загальний час дії електрохімічного розчинення становив 240 – 900 с для нерухомого електро-да, швидкість подачі – 0,6 – 3,5 мм/хв для експериментів з рухомим електро-дом.

Ефективність електрохімічного розчинення для різних амплітудно-часових параметрів імпульсів визначалася за коефіцієнтом виходу за струмом при зіставленні експериментальних і теоретично розрахованих показників.

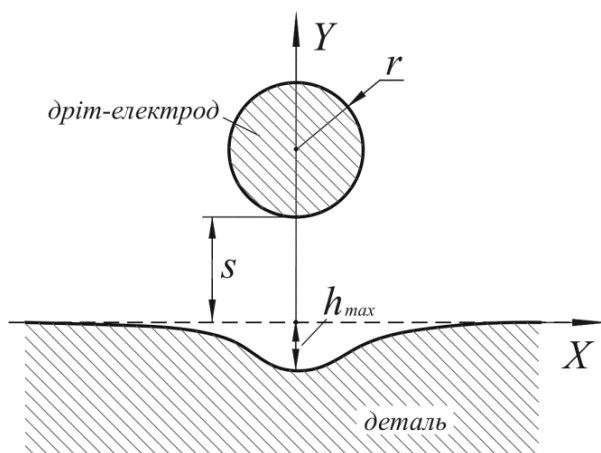


Рисунок 4.34 – Схема формування канавок на поверхні деталі в результаті анодного розчинення з нерухомим катодом

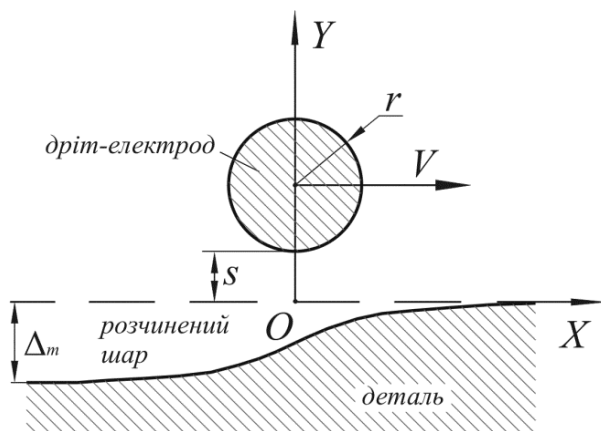


Рисунок 4.35 – Схема анодного розчинення поверхневого шару деталі з рухомим катодом

Для експериментів з нерухомим катодом коефіцієнт виходу за струмом

$$\eta = \frac{h_{екс}}{h_{max}}, \text{ де } h_{екс} - \text{глибина експериментально отриманої канавки, } h_{max} - \text{роз-}$$

рахункова глибина канавки. Теоретичний розрахунок проводився за математичною моделлю (пункт 2.3.2):

$$h_{\max} = \frac{2U\kappa}{a \ln(p)} K_v \frac{t_1}{T} t, \quad a = \sqrt{2rs + s^2}, \quad p = \frac{a-s}{a+s}; \quad (4.45)$$

де U – напруга на електродах, κ – провідність електроліту, K_v – електрохімічний еквівалент матеріалу анода, t_1 , T – тривалість і час імпульсу струму відповідно, t – загальний час розчинення, r – радіус дроту-електрода, s – величина міжелектродного проміжку.

Максимальна густина струму

$$i_{\max} = \frac{2U\kappa}{a \ln(p)}. \quad (4.46)$$

У таблиці 4.7 наведено амплітудно-часові параметри імпульсів струму, розраховано значення допустимої густини струму i_{PL} та значення коефіцієнта виходу за струмом η для експериментів з нерухомим катодом. Результати свідчать, що при відхиленні величини максимальної густини струму i_{\max} , реалізованої в експерименті, від розрахованої i_{PL} коефіцієнт виходу за струмом падає.

Таблиця 4.7 – Результати обчислення коефіцієнта виходу за струмом в експериментах з нерухомим катодом

Код експерименту	i_{\max} , А/см ²	t_1 , мс	T , мс	i_{PL} , А/см ²	η
6K1	5,6	2	8	6,95	0,96
6K2	14,97	2	8	6,95	0,64
6K3	31,08	2	8	6,95	0,48
6K4	30,91	2	4	6,04	0,38
6K5	28,9	1	2	8,54	0,43

Для технологічної схеми з рухомим дротяним електродом розрахунки проводилися за наступними формулами [217]. Коефіцієнт виходу за струмом

$$\eta = \frac{\Delta_{екс}}{\Delta_m},$$

де $\Delta_{екс}$ – виміряна товщина розчиненого шару в результаті експерименту,

Δ_m – розрахункова товщина розчиненого шару: $\Delta_m = \frac{2\pi U \kappa K_v t_1}{V \ln(p) T},$

V – швидкість руху дротяного електрода.

$$\text{Максимальна густина струму } i_{\max} = \frac{2U \kappa}{a \ln(p)}.$$

З рухомим дротяним електродом проведено серії експериментів. Найбільш переконливі результати наведено в таблиці 4.8. В експерименті 1П9 значення i_{\max} близьке до розрахованої величини i_{PL} і отримано високу ефективність ЕХО з коефіцієнтом виходу за струмом 0,9, а в експерименті 4П6(1) так вибрані технологічні параметри, що i_{\max} майже втричі перевищує допустиме значення i_{PL} , і маємо низьку ефективність процесу з коефіцієнтом виходу за струмом 0,15.

Таблиця 4.8 – Результати обчислення коефіцієнта виходу за струмом в експериментах з рухомим катодом

Код експерименту	$i_{\max},$ А/см ²	$t_1,$ мс	$T,$ мс	$i_{PL},$ А/см ²	η
1П9	4,59	5	10	4,68	0,90
4П6(1)	35,0	2	10	11,7	0,15

З підвищенням густини струму в експериментах з рухомим катодом спостерігалася загальна тенденція до зменшення шорсткості вихідної поверхні. Однак в експерименті 4П6(1) через значне порушення умови (4.45) отримали не тільки низьку ефективність виходу за струмом, але й гіршу якість поверхні порівняно з експериментом 1П9, де застосовувалася менша гус-

тина струму. Це означає, що побічні реакції, на які витрачається частина електричної енергії, призводять тільки до погіршення якості обробленої поверхні. Отже, для отримання якісної поверхні з низькою шорсткістю слід підвищувати густину струму, обов'язково зважаючи на вимоги наведеної вище розрахункової методики. Крім того, встановлений коефіцієнт виходу за струмом забезпечує точне прогнозування товщини знятого шару (термічно зміненого внаслідок електроерозійних іскрових розрядів) при застосуванні ЕХО в складі комбінованої електрохімічної і електроерозійної обробки дрітним електродом.

4.3.4 Експериментально-теоретичні дослідження коефіцієнта електрохімічного розчинення електроерозійно модифікованих поверхневих шарів і його зміни вглиб матеріалу за ЕХОДЕ

Експерименти по електрохімічній обробці поверхневого електроерозійно зміненого шару свідчать про відмінність процесу його розчинення від розчинення основного об'єму матеріалу. Напівпухкий поверхневий шар (зона А, рисунок 4.36) видаляється швидше. На межі невидаленого і напіврозчиненого шару (зона А і зона Б) з'являється характерна сходинка, що свідчить про різні електрохімічні характеристики верхнього шару і основного матеріалу деталі.

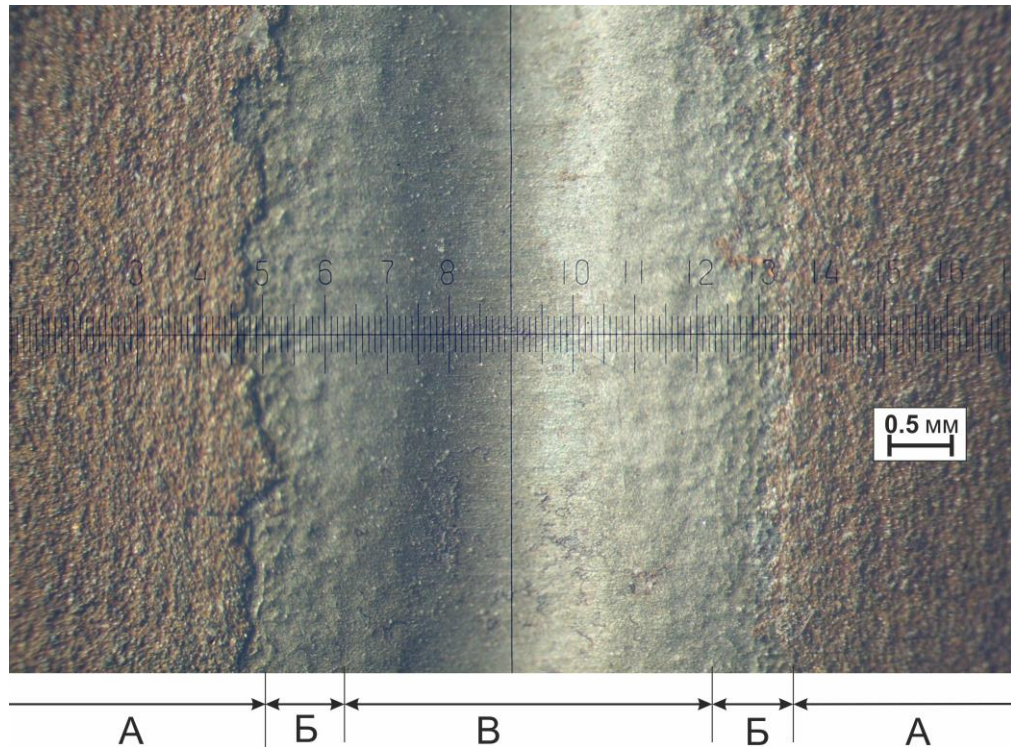


Рисунок 4.36 – Фотографія канавки на поверхні електроерозійно обробленої деталі, отримана при подальшому електрохімічному розчиненні нерухомим дріт'яним електродом: зони А – нерозчинений поверхневий шар, зони Б – напіврозчинений шар, зона В – розчинений матеріал основи

Зважаючи на те, що завданням другої стадії електрохімічної обробки в складі комбінованої електроерозійної та електрохімічної технології є видалення саме поверхневих шарів, постає важлива задача розробки уточненої розрахункової методики для визначення кількісних параметрів процесу анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів, що мають нерівномірні по товщині електрохімічні характеристики, шляхом введення до розгляду змінного електрохімічного еквіваленту матеріалу поверхневого шару.

Нехай шар І на поверхні анода (рисунок 4.37) товщиною h_1 має змінний електрохімічний еквівалент K_v , який змінюється з глибиною від значення K_1 при $y = 0$ до K_2 при $|y| \geq h_1$, тобто

$$K_v = \begin{cases} K_1 + (K_2 - K_1) \cdot \frac{\xi}{h_1}, & \text{при } 0 \leq \xi \leq h_1; \\ K_2, & \text{при } |y| \geq h_1. \end{cases} \quad (4.47)$$

При такому законі зміни K_v на границі електроерозійно модифікованого шару і основного матеріалу деталі ($y = h_1$) електрохімічні еквіваленти областей I і II збігаються. Далі зі збільшенням глибини коефіцієнт K_v набуває постійного значення K_2 , характерного для основного матеріалу деталі.

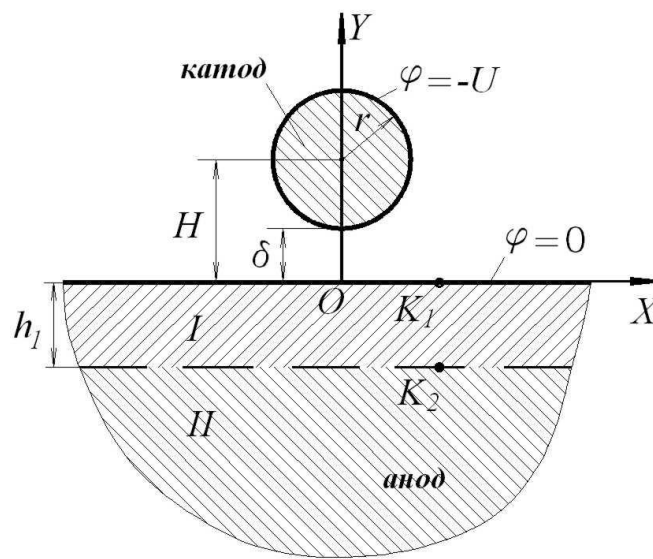


Рисунок 4.37 – Розрахункова схема двошарової поверхні анода при електрохімічній обробці дротяним катодом

Нехай у процесі електрохімічної розмірної обробки поверхня анода розчиняється під дією електростатичного поля від круглого в перерізі катода радіусом r , що знаходиться на віддалі H від анода та має міжелектродний проміжок δ (рисунок 4.37).

Якщо величина потенціалу на катоді дорівнює U , то розподіл напруженості поля на поверхні анода визначається за формулою [217]

$$E_y(x) \Big|_{y=0} = \frac{2 \cdot a \cdot U}{\ln p} \cdot \frac{1}{x^2 + a^2}, \quad (4.48)$$

$$t_1(x) = \frac{h_1 \cdot \ln p \cdot (x^2 + a^2)}{2 \cdot K_v \cdot \kappa \cdot U \cdot a}. \quad (4.51)$$

Знайдемо час розчинення, при якому координата x_1 займе характерні положення. При $x_1 = 0$

$$t_1(0) = \frac{h_1 \cdot \ln p \cdot a}{2 \cdot K_v \cdot \kappa \cdot U} \quad (4.52)$$

– момент часу, на який у точці $x = 0$ розчиниться поверхневий електроерозійно модифікований шар.

Знайдемо координату x_2 (рисунок 4.38) граничної точки розчинення поверхневого шару на кінцевий момент часу t_2 . Нехай $x_2 = \alpha \cdot a$. Знайдемо α , при якому $t_1(x) = t_2$:

$$t_1(\alpha \cdot a) = \frac{h_1 \cdot \ln a^2 \cdot (1 + \alpha^2)}{2 \cdot K_v \cdot \kappa \cdot U \cdot a},$$

звідси

$$\alpha = \sqrt{\frac{t_2 \cdot 2 \cdot K_v \cdot \kappa \cdot U}{h_1 \cdot a \cdot \ln p} - 1}. \quad (4.53)$$

Таким чином, α є важливим параметром, що характеризує ширину (вздовж поверхні анода) знятого електроерозійно модифікованого шару.

Знайдемо максимальну глибину канавки h . Розіб'ємо h на два доданки по областях I та II:

$$h = h_I + h_{II}, \quad (4.54)$$

де

$$h_I = K_{cp} \cdot \frac{2 \cdot \kappa \cdot U}{a \cdot \ln p} \cdot t_1(0) = h_1, \quad (4.55)$$

$$K_{cp} = (K_1 + (K_2 - K_1) \cdot \frac{\xi}{h_1}) \bigg|_{\xi = \frac{1}{2} h_1}, \quad (4.56)$$

$$h_{II} = K_2 \cdot \frac{2 \cdot \kappa \cdot U}{a \cdot \ln p} \cdot (t_2 - t_1(0)). \quad (4.57)$$

Далі визначимо кількість видаленого матеріалу за час t_2 дії струму, що характеризує продуктивність технологічного процесу електрохімічної розмірної обробки. Знайдемо площу розчиненого матеріалу на одиницю товщини анода:

$$S = S_I + S_{II}, \quad (4.58)$$

тут S_I – розчинений матеріал в області I;

S_{II} – розчинений матеріал в області II.

$$S_I = 2 \int_0^{\infty} K_{cp} \cdot \frac{2 \cdot a \cdot \kappa \cdot U}{\ln p} \cdot \frac{1}{x^2 + a^2} \cdot t_2 dx - 2 \int_0^{x_2} K_2 \cdot \frac{2 \cdot a \cdot \kappa \cdot U}{\ln p} \cdot \frac{1}{x^2 + a^2} \cdot t_2 dx.$$

$$\text{Або } S_I = 4 \cdot \frac{\kappa \cdot U}{\ln p} \cdot \left(K_{cp} \cdot \frac{\pi}{2} - K_2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{x_2}{a} \right) \cdot t_2. \quad (4.59)$$

$$\text{Складова } S_{II} = 2 \int_0^{x_2} K_2 \cdot \frac{2 \cdot \kappa \cdot U}{\ln p} \cdot \frac{1}{x^2 + a^2} \cdot t_2 dx,$$

$$\text{або } S_{II} = \frac{4 \cdot K_2 \cdot \kappa \cdot U}{\ln p} \cdot t_2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{x_2}{a}. \quad (4.60)$$

Розчинений об'єм

$$V = S \cdot L, \quad (4.61)$$

де L – товщина анода (деталі).

Для узгодження розрахункової схеми з реальним технологічним процесом електрохімічної обробки дротяним електродом проведено серії експериментів. Задача експериментальних досліджень полягала у визначенні геометричних параметрів канавок, отриманих внаслідок електрохімічного розчинення поверхневих шарів деталі при нерухомому положенні дроту-електрода.

Попередньо поверхня деталі товщиною 11,5 мм (сталь Х12Ф1) була модифікована внаслідок трипрохідної електроерозійної дротяної обробки. Технологічні режими першого проходу: амплітуда струму – 100 – 130 А, тривалість імпульсу струму – 3,2 мс, частота проходження імпульсів – 22 кГц. Другий прохід відповідно: амплітуда – 50 – 80 А, тривалість – 3,2 мс, частота – 22 кГц. Третій: амплітуда – 50 А, тривалість – 2,5 мс, частота – 44 кГц. Кін-

цева товщина електроерозійного зміненого шару знаходилася в межах 10-30 мкм.

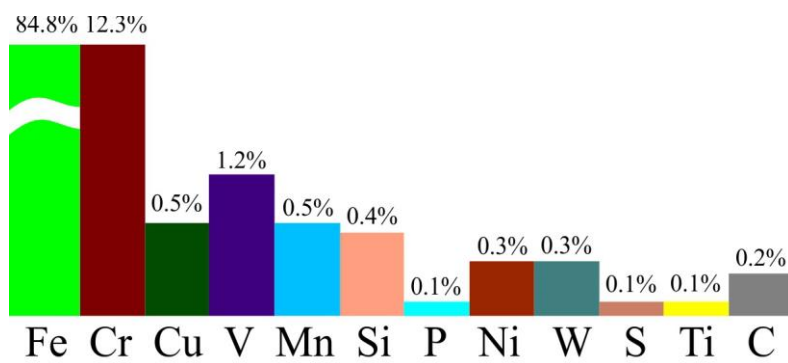
Електрохімічне розчинення проводилося в середовищі електроліту 1 М NaCl при температурі 37 – 42 °С. Як катод використовувався латунний дріт (ДКРПМ ФКТЛ63) діаметром 0,2 мм. Величина міжелектродного зазору варіювалася в межах 0,2 – 0,4 мм; напруга, підведена в міжелектродний проміжок, вибиралася в межах 4 – 12 В; тривалість електричних імпульсів становила 0,02 – 2 мс, шпаруватість – 2 – 4, загальний час дії електрохімічного розчинення становив 240 – 900 с.

Порівняння визначених експериментально і розрахункових розмірів канавок дало можливість уточнити чисельні значення коефіцієнтів електрохімічного розчинення поверхневих шарів сталі, отриманих за різних технологічних умов обробки.

4.3.5 Результати дослідження хімічного складу поверхневих шарів сталі X12Ф1 після ЕЕВО та ЕХРО

Проведено дослідження хімічного складу поверхневих шарів сталі X12Ф1 після електроерозійної вирізної обробки та електрохімічної обробки дротяним електродом за допомогою рентгенофлуоресцентного спектрометра S1 TITAN виробництва компанії Bruker.

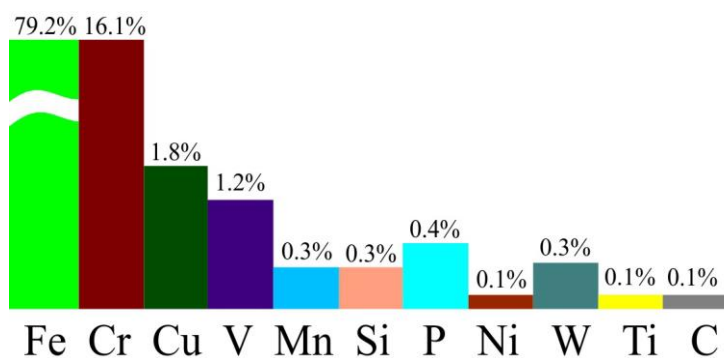
На рисунку 4.39, *а, б* зображено діаграму хімічного складу поверхневих шарів та фотографію вихідної поверхні відповідно. Після електроерозійного чорнового проходу повного зйому поверхня набула характерного жовтуватого кольору (рисунк 4.39, *г*), і приблизно в три рази збільшився вміст міді в поверхневих шарах (рисунк 4.39, *в*). Це результат оберненого переносу матеріалу латунного дротяного електрода на поверхню деталі, відомого в практиці ЕЕВО і зумовленого наявністю частини імпульсу струму зворотної полярності в затухаючому процесі після його вимкнення.



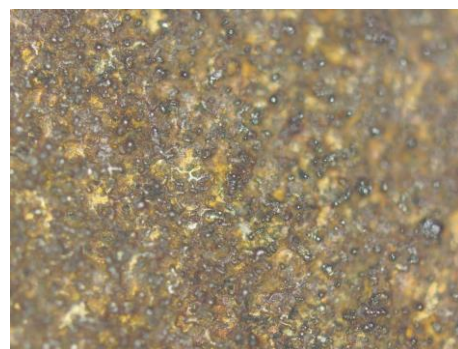
a)



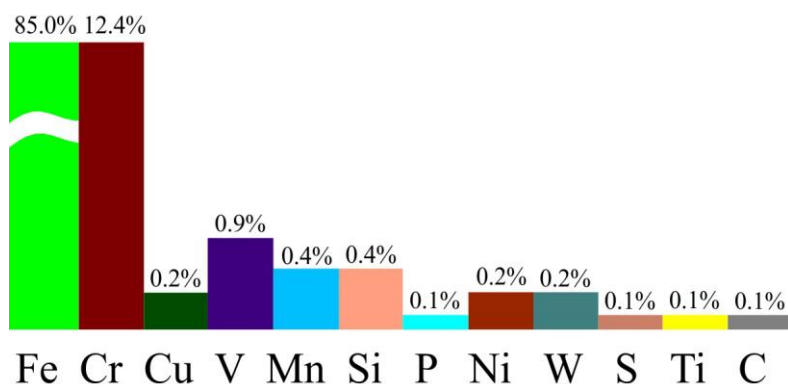
б)



в)



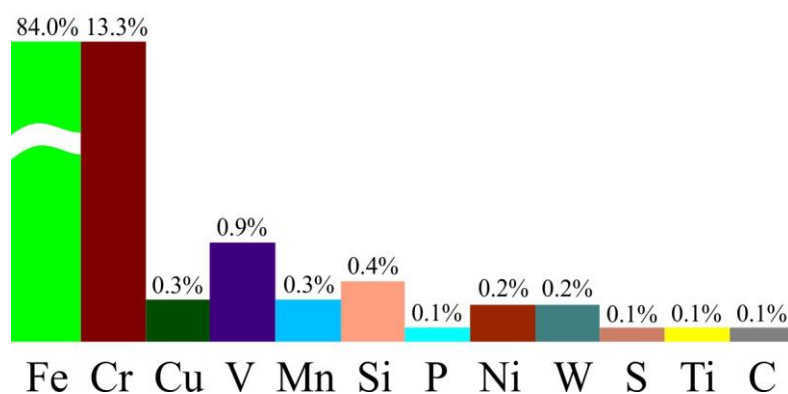
в)



г)



г)



д)



д)

Рисунок 4.39 – Діаграми хімічного складу поверхні та фотографії (x100) поверхні сталі Х12Ф1: *а), б)* вихідної поверхні; *в), г)* після електроерозійної обробки; *д), е)* після електрохімічної обробки № 1; *ж), з)* після електрохімічної обробки № 2

Наступна електрохімічна обробка дротяним електродом на різних потужностістатичних режимах (таблиця 4.9) привела до видалення поверхневого зміненого шару, і хімічний склад набув значень відповідних параметрів матеріалу основи (рисунки 4.39, *д, ж*). Сама ж електрохімічна обробка не внесла суттєвих змін у хімічний склад поверхні порівняно зі складом вихідної поверхні.

Таблиця 4.9 – Технологічні параметри режимів ЕХРО дротяним електродом

Номер режиму	Тривалість робочого імпульсу, мкс	Період імпульсів, мс	Амплітуда напруги, В	Швидкість руху катода, мм/с	Товщина знятого шару, мкм
№1	250	6	8,6	0,25	32
№2	100	2	11	0,167	60

Висновки за розділом 4

1. На основі результатів комплексу обчислювальних та фізичних експериментів з використанням електрохімічних комірок з осесиметричною та плоскопаралельною подачею електроліту запропоновано підходи до узгодження гідравлічних режимів течії електроліту з амплітудно-часовими параметрами імпульсного джерела живлення.

2. Проведеним комплексом експериментальних досліджень уточнено величини коефіцієнтів виходу за струмом залежно від густини імпульсного струму та структури, утвореної попередньою термічною обробкою матеріалу при електрохімічному розчиненні АRМСO-заліза та сталей Х12Ф1, У8А, ШХ15, Сталь 45.

3. Набули подальшого розвитку уявлення про механізми анодного розчинення сталей з різними гомогенними та гетерогенними структурами. Встановлено, що відповідна термічна обробка може видалити всі макроскопічні сегментації карбіду, а потім встановити тонкозернисту мікроструктуру. Однорідна мікроструктура приводить до мікроскопічно рівних поверхонь сталевих субстратів після електрохімічного розчинення металу, застосовуючи високі швидкості потоку електролітів і високу густину струму.

4. Доведено відсутність обґрунтованих адекватних критеріїв оцінювання локалізації процесу анодного розчинення при використанні технологій ЕХОДЕ.

5. Підтверджено суттєвий вплив на локалізацію процесу ЕХОДЕ величини МЕР.

6. На основі комплексу експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано та обґрунтовано використання як критеріїв оцінювання локалізації процесу анодного розчинення при використанні технологій ЕХОДЕ величини зони розчинення та ексцесів (E_s) розподілу густини струму й активності розчинення по поверхні анода. Їх комплексне використання забезпечує принципову можливість кількісно описати та виокремити вплив на локальність процесу розчинення конфігурації напруженості електричного поля в електрохімічній комірці з циліндричним електродом, яка обумовлена величиною МЕР та діаметром дроту, і, відповідно, адекватно оцінити внесок параметрів електроліту та АЧПДЖ у рівень локалізації процесу розчинення.

7. Розроблено розрахункову методику моделювання на основі методів обчислювальної гідродинаміки (CFD-методів), яка суттєво підвищує продуктивність і точність проектування пристроїв подачі робочої рідини для технологічних процесів. На основі розрахункових та експериментальних досліджень запропоновано конструкцію сопла, яка забезпечує необхідні гідродинамічні характеристики подачі струменя робочої рідини в зону обробки при послідовних технологіях ЕЕВОДЕ та ЕХРОДЕ.

8. Проведено апробацію математичної моделі. Встановлено, що для різних конфігурацій внутрішньої будови сопла та входних тисків подачі електроліту, характерних для роботи системи в режимі ЕХРОДЕ, отримані розбіжності з експериментальними даними знаходяться в межах допустимої інженерної точності.

9. Спираючись на методи обчислювальної гідродинаміки, розроблено математичну модель руху електроліту в міжелектродному проміжку для технологічної схеми плоский анод – циліндричний катод при коаксіальній подачі струменя електроліту за допомогою сопла. Для більш точного задавання граничних умов на вході струменя в МЕП модель виконує додатковий розрахунок потоку всередині сопла. Підтверджено адекватність моделі шляхом зіставлення результатів з відомими аналітичними розв'язками рівнянь Прандтля для пограничного шару при поздовжньому обтіканні тонкої пластинки для малих та великих чисел Рейнольдса набігаючого потоку. Обґрунтовано межі застосування моделі для фазового складу потоку, його швидкості та величини МЕП.

10. За результатами проведеного комплексу обчислювальних експериментів отримано поля швидкостей потоку електроліту в міжелектродному проміжку залежно від гідродинамічних умов подачі та величини МЕП. Виявлено ділянки на аноді з критично малою чи суттєво нерівномірною швидкістю потоку електроліту. Через низьку швидкість оновлення електроліту ці ділянки обмежують максимальне значення підведеної електричної енергії. Враховуючи це та спираючись на результати моделювання, запропоновано практичні рекомендації по вибору умов подачі електроліту, які дають змогу отримати максимально можливі швидкість та рівномірність потоку.

11. На основі зіставлення отриманих розподілу швидкостей потоку електроліту і точного аналітично представленого розподілу струму на поверхні анода запропоновано методику узгодження гідравлічних режимів течії електроліту з амплітудно-часовими параметрами імпульсного джерела живлення. Її використання дає можливість для кожного конкретного випадку ви-

соти деталей, величини МЕР, параметрів подачі електроліту проектувати амплітудно-часові параметри імпульсів струму, які забезпечують рівномірність і стабільність розчинення по всій висоті обробки. Експериментальна перевірка підтвердила ефективність практичного використання отриманих результатів досліджень та їх сприяння підвищенню стабільності та прогнозованості електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом як технології.

12. У ході теоретично-експериментальних досліджень процесів анодного розчинення при електрохімічній обробці дротяним електродом встановлено, що розроблена математична модель дифузії в прианодних шарах дає можливість розрахувати технологічні параметри, які забезпечать максимальну ефективність ЕХО по виходу за струмом. Проведені зіставлення результатів експериментів з дотриманням теоретичних рекомендацій і з відхиленням від них доводять, що створена методика дає можливість виконати обґрунтований вибір амплітудно-часових параметрів джерела живлення при проектуванні технологічних процесів електрохімічної обробки дротяним електродом. Запропонований підхід з використанням математичного моделювання дає змогу в перспективі перейти до застосування більш складних форм імпульсів технологічного струму, що надасть додаткові важелі в керуванні процесами в МЕР для покращення якості вихідної поверхні внаслідок анодного розчинення дротяним електродом.

13. Запропоновано вдосконалену методику розрахунку кількісних параметрів процесу анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів, що мають не рівномірні по товщині електрохімічні характеристики, яка дає змогу уточнити чисельні значення коефіцієнтів електрохімічного розчинення поверхневих шарів сталі та може забезпечити суттєве підвищення точності розрахунків параметрів процесів електрохімічної модифікації поверхонь дротяним електродом.

РОЗДІЛ 5

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СКЛАДНОКОНТУРНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗА КОМБІНОВАНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

Однією з найбільш важливих проблем ЕЕДВ як технології є спотворення траєкторії різку та форми поверхні, що обробляється [233]. Ці спотворення зумовлені обмеженою поперечною жорсткістю дротяного електрода-інструмента. Тому сили, які виникають внаслідок розрядів у МЕР, викликають помітне відхилення дроту від вертикального положення. Інтегральна сила, що діє при різанні, зазвичай спрямована у бік, протилежний напрямку подачі. Внаслідок цього при зміні напрямку різання траєкторія ДЕІ при обробці може істотно відрізнитися від заданої програмної траєкторії вузлів його фіксації, які переміщуються за допомогою приводів подачі. Власне кажучи, спотворення траєкторії різку є проявом відомої проблеми динаміки системи верстат – пристосування – інструмент – деталь. Для випадку ЕЕДВ до розгляду необхідно додатково включити також МЕР як деякий «пружний» елемент, разом з тим деформаціями верстата і пристосування можна знехтувати. Таким чином, у випадку ЕЕДВ має місце проблема динаміки системи деталь – МЕР – ДЕІ.

Для вирішення проблеми боротьби зі спотворенням форми деталі, що вирізається, необхідно знати точну величину викривлення дроту в необхідному перетині різку за виконання конкретної технологічної операції вирізання. Далі слід провести моделювання формоутворення отриманої поверхні і встановити величини відхилень від заданої форми і місця, де відхилення виходять за межі технічного завдання.

Існують розроблені стратегії компенсації спотворень форми отриманої поверхні шляхом коригування самого процесу електроерозійного вирізання [224, 233, 237, 238]. Використовують методи пригальмовування або зупинки

приводів подачі для вирівнювання дротяного електрода перед зміною його напрямку руху. Використовуються способи корекції траєкторії переміщення дротяного електрода на величину прогину без зниження швидкості різання.

Усунення похибок формоутворення методом анодного розчинення у складі комбінованої технології електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом потребує попереднього моделювання перерозподілу електростатичних полів, який відбувається в конкретних місцях траєкторії руху інструменту, де поверхня має спотворення форми. Шляхом вибору параметрів електрохімічного розчинення (швидкості руху дротяного електрода-інструменту, амплітудно-часових параметрів імпульсного струму та ін.) при проектуванні технологічного процесу досягається вирівнювання прямолінійності твірної поверхні до значень, допустимих технічним завданням.

5.1 Оцінювання природи та параметрів силового навантаження, що діє на дротяний електрод у процесі обробки та призводить до його прогину

Забезпечення необхідної точності формоутворення деталі нежорстким дротяним електродом за ЕЕВО є однією з актуальних проблем, над вирішенням якої продовжують працювати багато дослідників. Електроіскрова обробка більше не розглядається як процес «без сил» [75]. Дослідження проводяться для того, щоб зрозуміти, які сили діють на зміну форми електрода і як вони можуть впливати на точність обробки. Зростаюча значимість силових факторів викликана двома напрямками розвитку сучасної ЕЕВО. Перший – забезпечення високої точності при різанні товстих деталей 300 мм на серійних верстатах [171]. Збільшення відстані між точками фіксації дротяного електрода неминуче призводить до втрати його поперечної жорсткості. Другий – збільшення продуктивності ЕЕВО до 500 мм²/хв. [151], що досягається високою інтенсивністю іскрових розрядів, які, в свою чергу, викликають збільшення силового навантаження на електрод. Все це в сукупності призводить до відхилення дротяного електрода від прямолінійної форми, втрати контро-

лю над формоутворенням поверхні і, можливо, до виходу за межі параметрів точності, що висуваються до прецизійних деталей.

У ході розвитку методу електроерозійної обробки непрофільованим дротяним електродом багато авторів приділяли значну увагу питанням підвищення точності обробки. До основних первинних похибок більшість авторів відносять такі: похибки, обумовлені геометричною неточністю приводів верстата; похибки, викликані коливаннями дроту в напрямних; похибки, спричинені неточністю виготовлення дроту; похибки, обумовлені наявністю міжелектродного електричного проміжку; похибки, зумовлені неточністю визначення координат базових поверхонь; похибки, викликані зносом дроту; похибки температурних деформацій; похибки, спричинені внутрішніми залишковими напруженнями; похибки, обумовлені прогинами дротяного електрода під дією силових електричних розрядів. Більшість із них зведено до мінімуму, але найсуттєвіша, викликана прогинами дротяного електрода, залишається нездоланною повною мірою. Як наслідок похибка формоутворення на чорновому різанні повного зйому може становити 0,02-0,4 мм залежно від технологічних умов і конфігурації контуру, що вирізається.

Завдання підвищення точності поділяють на дві частини: визначення прогину дроту для конкретних умов технологічного процесу ЕЕВО і розробка стратегій компенсації похибки.

Апаратний контроль форми дротяного електрода в режимі реального часу (on-line) запропонували свого часу і використовують на своїх верстатах у вигляді системи AGIEPILOT розробники електроерозійних верстатів фірми AGIE [7, 25]. Датчик позиціонування дроту складається з двох оптичних пар, розташованих у взаємно ортогональних напрямках. Між ними перебуває дротяний електрод. Коліміроване світло проходить повз електрод і потрапляє на об'єктив, що самофокусується, за яким знаходяться два оптоволокна. За різницею інтенсивності сигналу на них визначають зміщення електрода. Датчик розташований між верхньою напрямною дротяного електрода і поверхнею деталі. Вимірювання відбувається далеко від зони ерозії, тобто від місця мак-

симального прогину. Тому використовується математична модель пружного стану дроту під дією поперечного розподіленого навантаження для перерахунку цих вимірювань у значення максимального прогину.

Згодом, з розвитком обчислювальних потужностей комп'ютерної техніки і появою програмних систем автоматизованого проектування, стало можливим і більш раціональним попереднє проектування технологічного процесу ЕЕВО, до його безпосередньої реалізації. При цьому завдання прогнозування форми дротяного електрода і відповідного формоутворення поверхні при його русі по заданому контуру вирішується по-різному.

Багато дослідників застосовують статистичні методи аналізу багатопараметричних експериментальних даних (ANOVA методи, Taguchi методологію), будують рівняння регресії і на основі узагальнення отриманого досвіду пропонують проводити проектування наступних технологічних процесів ЕЕВО. В роботі [37] досліджуються похибки формоутворення під час вирізання зовнішніх і внутрішніх кутів з малими радіусами заокруглення при вершині. Використовується трипрохідна обробка і відзначається, що перший чорновий різ вносить найбільшу похибку, викликану відхиленням дротяного електрода. За допомогою наступних двох фінішних проходів похибка зменшується. Отримано співвідношення між величиною розхилу кута, радіусом при вершині і кількістю залишеного, невибраного матеріалу на основі суто геометричної моделі, і автори вважають, що результат не залежить від матеріалу заготовки. Також статистичні методи використовуються в роботі [160] при дослідженні електроерозійного вирізання кутів деталей з важкооброблюваного традиційними методами сплаву Monel 400, що складається в основному з нікелю 67,4 %, міді 29,24 % та інших компонентів. В роботі [12] автори вказують на необхідність аналізу силового впливу на дротяний електрод в результаті іскрових розрядів та їх зміни при обході кутів. Однак згодом використовують спрощену модель форми електрода, в якій приймається однаковий прогин по всій висоті різy, пропонують суто геометричну, еліптичну модель побудови траєкторії під час вирізання кутів. У підсумку використову-

ється узагальнена нелінійна регресивна модель для оптимізації технологічних параметрів з метою зменшення похибки при обробці кутів. Автори робіт [133, 150] провели ранжування параметрів ЕЕВО за ступенем впливовості на похибку формоутворення при конусному різанні (чотирикоординатна обробка з великими кутами нахилу), використовуючи методи систематизації статистичних даних експериментів. Показано, що при великих деформаціях дротяного електрода визначальну роль відіграють геометричні параметри – кут нахилу, товщина деталі й механічні параметри самого дроту. Автори роблять припущення про невелику значущість технологічних параметрів ЕЕВО, і подальше моделювання проводиться без урахування їх впливу на форму електрода. Використано нелінійну модель на основі методу скінченних елементів (МСЕ) для уточнення рівня деформації дротяного електрода поблизу напрямних. Експерименти проводилися з використанням зразків з інструментальної сталі і карбіду бору, режими обробки яких за енергетичними параметрами іскрових розрядів відрізнялися майже в два рази. Очевидно, використана МСЕ-модель досить точно враховує статичну деформацію при викривленні електрода в широко розведених напрямних в умовах конусного різання, але не відображає зміни форми при істотній зміні поперечного навантаження на електрод від впливу іскрових розрядів [163].

Експериментальні дослідження з використанням методу Taguchi, які включають 13 контрольних факторів з трьома рівнями, наведено в роботі [135]. Оброблялася заготовка товщиною 28 мм зі штампової сталі (0,85 % С, 4 % Cr, 6,25 % W, 5 % Мо, 2 % V), загартована і відпалена. При порівнянні дисперсії і ступеня внеску для кожного контрольованого фактора встановлено, що найбільш значущими факторами геометричної похибки через прогин дроту є час дії імпульсу, час паузи між імпульсами та імпульсний піковий струм протягом чорнового різання. Саме інтенсивність іскрових розрядів визначає величину бічного навантаження на дротяний електрод, що викликає його відхилення. Виявлено також, що швидкість чорнового різання залежить від зміни перелічених вище параметрів і пропорційна рівню енергії, підведе-

ної в зону обробки та виділеної протягом проходження розрядів. Тобто швидкість різання може служити показником величини бічного навантаження на електрод. На жаль, автори не навели формул, що дають можливість кількісно визначити такий зв'язок. У більш пізній роботі [153] відображено результати експериментів по обробці пластин різної товщини з такої ж штампової сталі. Вирізувалися циліндри, вимірювалися похибки форми і за розробленою авторами математичною моделлю, що пов'язує розподілене навантаження, прогин дротяного електрода і параметри формоутворення при русі вигнутого електрода по колу, розраховувалася величина інтенсивності сил іскрових розрядів. Встановлено, що $q \cdot t = \text{const} = 24,372 \times 10^{-3}$, де q (кГ/мм) – інтенсивність сил, викликаних іскровими розрядами, t (мм) – висота обробки. Отримане співвідношення дає можливість обчислити інтенсивність сил, а отже, і прогин електрода для різних висот обробки при інших, схожих з експериментом, умовах обробки.

Результати експериментів прямого виміру сил від дії іскрових розрядів наведено в роботі [75]. Використовувалися п'єзокерамічні датчики для реєстрації динамічних сил, лазерним інтерферометром контролювався міжелектродний проміжок, дві високошвидкісні камери з програмним керуванням затримок для синхронізації за часом з іскровим розрядом дали змогу спостерігати розвиток газових бульбашок у діелектричній рідині і визначати параметри вібрації та величину відхилення електрода від впливу сил, що виникають. Хоча дослідження проводилися для параметрів імпульсів прошивної електроерозійної обробки, отримані закономірності дають можливість зрозуміти суть загальних фізичних процесів виникнення і розвитку сил, пов'язаних з іскровим розрядом у рідині.

Відхиленню дротяного електрода сприяють також гідродинамічні сили струменя робочої рідини, яка подається в міжелектродний проміжок з верхньої та нижньої камер промивання [72, 122]. Засобами обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics – CFD) у комерційному програмному пакеті ANSYS по MCE проведено моделювання прогину дротяного елект-

рода і порівняння результатів з експериментальними вимірами. Отримано цікаву залежність прогину електрода від довжини прорізаного паза. Встановлено, що зі збільшенням тиску в камерах промивання поліпшується евакуація продуктів ерозії з міжелектродного проміжку, але при цьому збільшується прогин дротяного електрода, що негативно впливає на точність обробки. І, навпаки, зі зменшенням тиску зменшується прогин і погіршується видалення продуктів ерозії, що призводить до зниження швидкості різку і навіть до обриву дроту. Отримано дуже важливі кількісні дані розподілу потоку робочої рідини, що ініціює прогин дротяного електрода, але, зважаючи на необхідність використання потужного обчислювального ресурсу, досить проблематичним виглядає використання методу в повсякденній практиці інженерного проектування технологічних процесів ЕЕВО.

Досліджено дію електростатичних і електромагнітних сил, що викликають відхилення електрода в роботі [35]. Аналіз похибки формоутворення під час вирізання зовнішніх гострих кутів з тонких пластин показав, що напрямок вигину вістря кута залежить від складу оброблюваного матеріалу – алюмінію або вуглецевої сталі. Наведено формулу для оцінювання внеску електромагнітних сил у сумарний вплив на дротяний електрод. Суттєвого значення похибка досягає при обробці дуже гострих кутів на малих товщинах заготовки.

Розробка стратегій компенсації похибок формоутворення, викликаних прогином дротяного електрода, розглядається в роботах ряду авторів [51, 57-59]. Принципи керування ЕЕВО зрозумілі – зменшення прогину і похибки формоутворення можна отримати за рахунок зниження швидкості різку, але при цьому знижується продуктивність процесу. Кількісно визначити баланс між продуктивністю і точністю формоутворення перешкоджає не вирішена до кінця проблема визначення точної форми дротяного електрода в умовах конкретного технологічного процесу.

Мета цього підрозділу роботи – розробка експериментально-розрахункової методики і отримання рівняння для розрахунку величини роз-

поділеного зовнішнього навантаження, що діє на дріт при різанні певних груп сталей і твердих сплавів. Це дасть можливість на етапі проектування технологічного процесу розрахувати дійсну форму дрітчастого електрода і з її урахуванням будувати технологію обробки та відповідну траєкторію руху приводів верстата.

Проведено серії експериментальних досліджень, метою яких було встановлення взаємозв'язку між швидкістю електроерозійного різання V і розподіленим навантаженням q від дії електричних розрядів. Експериментальні залежності при різанні різних марок сталей і твердих сплавів зображено на рисунку 5.1. Різні швидкості першого чорнового різання отримано при обробці різної товщини заготовок. Для технологічних умов кожного експерименту вимірювався максимальний прогин дрітчастого електрода і згідно з математичною моделлю підпункта 2.2.1.2 проводився розрахунок розподіленого навантаження, що викликало відхилення електрода.

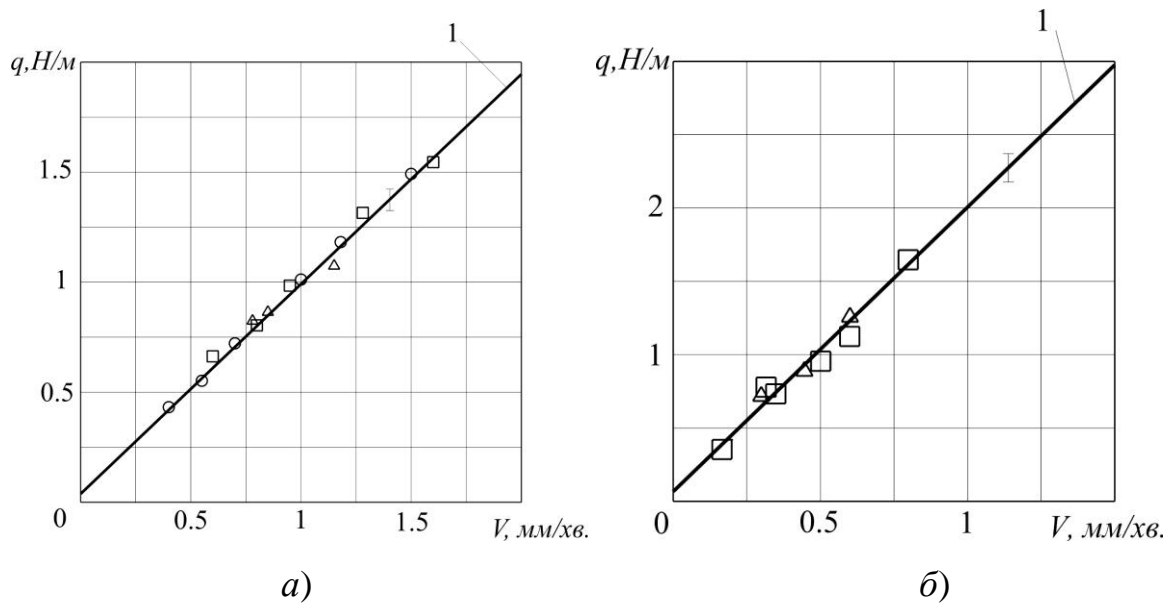


Рисунок 5.1 – Залежність розподіленого навантаження на дрітчастий електрод діаметром 0,2 мм від швидкості різання: а) сталей (\circ – Сталь 45, \square – У8, Δ – 15ХМ); б) твердих сплавів (\square – ВК8, Δ – ВК20)

Отримані дані для досліджуваних сталей і твердих сплавів у межах похибки, що не перевищує 6 %, апроксимовані лінійною функцією (рисунок 5.1, пряма 1):

$$q = k \cdot V + q_0, \quad (5.1)$$

причому, для сталей

$$q_{st} = 0.953 \cdot V + 0.025, \quad (5.2)$$

для твердих сплавів

$$q_{tc} = 1.94 \cdot V + 0.04. \quad (5.3)$$

Експериментальні дослідження впливу величини проміжку між соплом промивання і деталлю на величину ΔP виконано за допомогою обладнання та за методикою підпункту 2.2.1.3, і результати зображено на рисунку 5.2. Вимірювання проводилися за значення тиску на виходах із сопел $P_a = P_b = 5 \cdot 10^5$ Па і $\Delta a = \Delta b$.

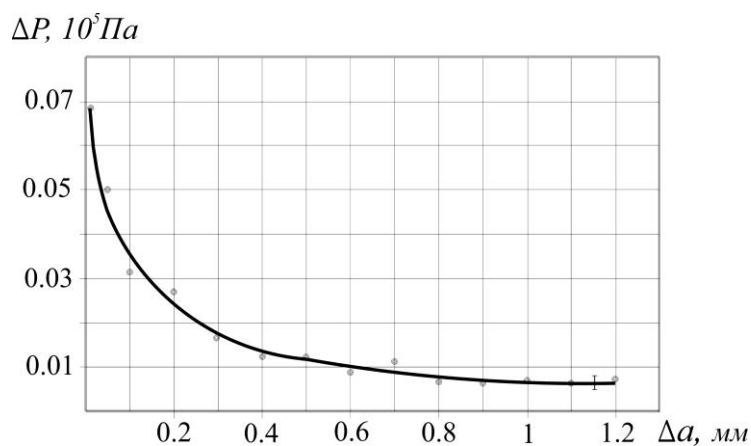


Рисунок 5.2 – Залежність падіння тиску робочої рідини між передньою і задньою поверхнями дрітного електрода від проміжку між соплом і корпусом деталі

Як видно з рисунка 5.2, при зменшенні проміжку до 0 величина ΔP , а отже, і швидкість промивання проміжку збільшуються. Однак при цьому збільшується ймовірність втрати точності і браку через зміщення напрямних внаслідок зусилля контакту рухомого сопла із заготовкою. Тому доцільно

виставляти зазор, рівний $\Delta a = \Delta b = 0,02...0,05$ мм, що дає змогу уникати прямих механічних контактів сопла і заготовки та істотного збільшення витрати робочої рідини через міжелектродний проміжок. Надалі всі дослідження проводилися при $\Delta a = \Delta b = 0,02...0,05$ мм.

Інший конструктивний варіант полягає в застосуванні підпружинених вихідних частин сопел, які повністю лягають на поверхню заготовки.

Результати вимірювання розподілу ΔP по висоті паза для товщин 20, 45 та 100 мм і тиску в гідросистемі верстата $P_a = P_b = 2,5 \cdot 10^5$ Па і $P_a = P_b = 5 \cdot 10^5$ Па зображено на рисунку 5.3.

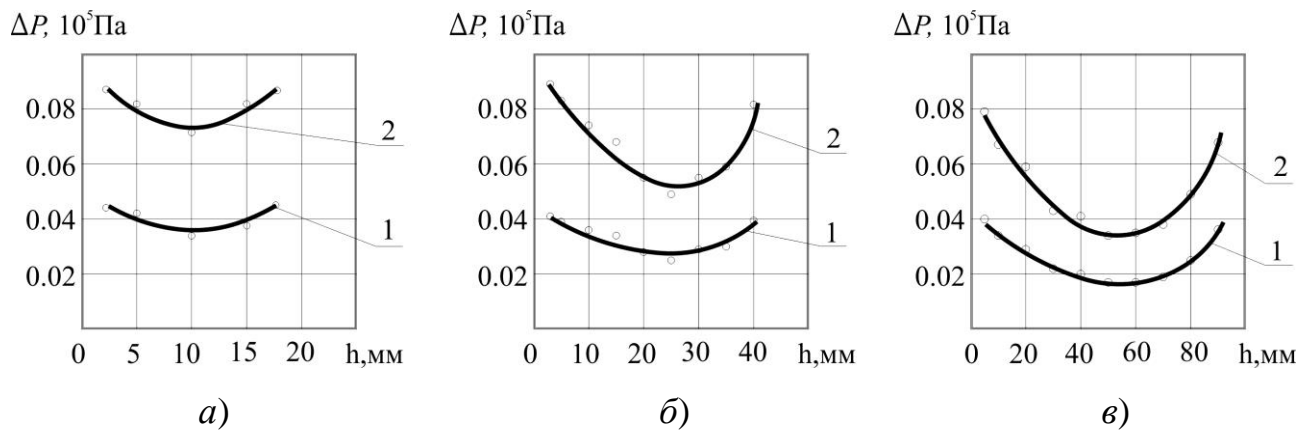


Рисунок 5.3 – Розподіл падіння тиску робочої рідини по висоті для різних товщин заготовок, що розрізаються: 1 – $P_a = P_b = 2,5 \cdot 10^5$ Па; 2 – $P_a = P_b = 5 \cdot 10^5$ Па; а) $h = 20$ мм; б) $h = 45$ мм; в) $h = 100$ мм

В усіх експериментах спостерігається зменшення ΔP від нижньої і верхньої поверхонь заготовки до середини паза, а отже, в цих напрямках існує градієнт швидкості поперечного обтікання дротяного електрода. Коаксіальна промивка, при однакових умовах прокачування зверху і знизу, утворює в перетинах, близьких до середини заготовки, «застійну зону», в якій швидкість промивання МЕП мінімальна, а теплове навантаження на дротяний електрод максимальне. Різниця ΔP між крайніми і середнім перетинами збільшується зі зростанням товщини заготовки, що пояснює зменшення продуктивності різання за $h > 50$ мм.

Із рисунка 5.1, *a* випливає, що при обробці Сталі 45 і різних марок сталей з однаковими швидкостями величини розподілених навантажень різняться незначно. Те саме можна сказати і про тверді сплави. Отже, немає необхідності отримувати залежність (5.1) окремо для кожної марки досліджуваної сталі або твердого сплаву, тому що їх відмінності не перевищують 2 – 6 %.

Цей факт можна пояснити тим, що електроерозійна оброблюваність (залежність інтенсивності ерозії від властивостей матеріалу) всередині груп досліджених сталей і твердих сплавів відрізняється незначно. Ерозійна оброблюваність твердих сплавів приблизно в два рази гірша, ніж у сталей, що і спричиняє зростання більш ніж на 100 % електродинамічних навантажень на дріт при тих же швидкостях різання. З огляду на те, що ерозійна оброблюваність матеріалів залежить від їх теплофізичних параметрів (теплопровідності, теплоємності, температур плавлення і випаровування), результати експериментів можна використовувати для визначення q при обробці інших сталей і твердих сплавів, теплофізичні параметри яких не відрізняються більш ніж на 10 – 15 % від параметрів досліджених матеріалів.

Достовірність останнього твердження і працездатність моделей було експериментально перевірено при різанні сталі 30ХГСА завтовшки 25 мм і 45 мм, а також твердого сплаву ВК10 товщиною 15 мм і 25 мм. Відмінності теплофізичних констант цих матеріалів від раніше досліджених не перевищують 10 %. Встановлено, що величини максимальних прогинів дрютяного електрода на зазначених товщинах відрізнялися від розрахункових значень на 0,006 – 0,015 мм (таблиця 5.1), що становить 4 – 5 %.

Таблиця 5.1 – Порівняння експериментальних і розрахункових значень прогину дротяного електрода

Матеріал	Товщина, мм	Діаметр дроту, мм	Максимальний прогин дроту, мм (розрахунок)	Максимальний прогин дроту, мм (експеримент)	Розходження експерименту і розрахунку, %
30ХГСА	25	0,2	0,160	0,152	5,2
30ХГСА	45	0,2	0,213	0,207	2,8
ВК-10	15	0,2	0,233	0,244	4
ВК-10	25	0,2	0,293	0,308	4,8

Також у ході експериментів було проведено вимірювання повної форми дротяного електрода за методикою, наведеною в підпункті 2.2.1.1. Встановлено, що теоретично розрахована форма за формулами математичної моделі підпункту 2.2.1.2 і експериментально виміряні координати прогинів не відрізняються більш ніж на 9 % по всій висоті прорізаного паза.

Теоретична оцінка величини поперечного навантаження на дротяний електрод за формулами підпункту 2.2.1.3 і отримані значення внаслідок апроксимації експериментальних даних (5.2), (5.3) показують, що зусилля, спричинені потоком рідини, на порядок менші навантаження від дії іскрових розрядів. Відмінність останніх доданків у (5.2) і (5.3) можна пояснити різною товщиною відкладень продуктів ерозії на бічних стінках прорізаного паза. При обробці твердого сплаву більш інтенсивно відбувається зворотний перенос латуні з дротяного електрода на поверхню деталі і значно звужується перетин виходу потоку промивання з МЕР.

Розроблена експериментально-розрахункова методика є дієвим інструментом у наповненні бази даних для визначення точної форми дротяного електрода при обробці інших груп матеріалів, у тому числі новітніх сплавів. Результати служать основою для проектування технологічного процесу ЕЕВО із застосуванням САПР. При проектуванні обробки складноконтурних

деталей слід враховувати зміну інтенсивності розрядів (навантаження) у процесі обходу кутів і при русі по дугах кіл. Використовуючи кількісні геометричні параметри форми деталі, що отримується, можливо цілеспрямовано застосовувати методи компенсації впливу прогинів дротяного електрода на точність обробки і формоутворення поверхні.

5.2 Комп'ютерне моделювання тривимірного розподілу густини струму по поверхні анода при використанні циліндричних електродів

Технологічна схема застосування комбінованої обробки ЕЕВО ДЕ та ЕХРО полягає в наступному. Після виконання вирізної електроерозійної операції деталь залишається закріпленою на призмах верстата зі збереженням координат позиціонування. Далі виконується електрохімічна обробка. З верхньої камери верстата під дією тиску подається струмінь електроліту вздовж ДЕІ, який є катодом (рисунок 5.4, *a*). Деталь слугує анодом. Міжелектродний проміжок заповнюється електролітом, який постійно оновлюється. Приводи верстата по керуючій програмі переміщують ДЕІ за траєкторією, що відповідає траєкторії електроерозійного вирізання з урахуванням еквідистанти – зміщення, яке забезпечує задане значення міжелектродного проміжку протягом усієї операції електрохімічної обробки. Швидкість переміщення ДЕІ, параметри імпульсного струму, склад та концентрація електроліту визначають товщину розчиненого поверхневого шару. Звичайно, на швидкість проходження електрохімічних реакцій впливають багато чинників, але все ж визначальною згідно з законом Фарадея є густина струму, підведена до кожної ділянки поверхні анода. Тому важливим є попередній розрахунок розподілу напруженості електростатичного поля на поверхні анода при проектуванні технологічної схеми із застосуванням циліндричного дротяного катода, яка б забезпечувала рівномірну товщину знятого шару.

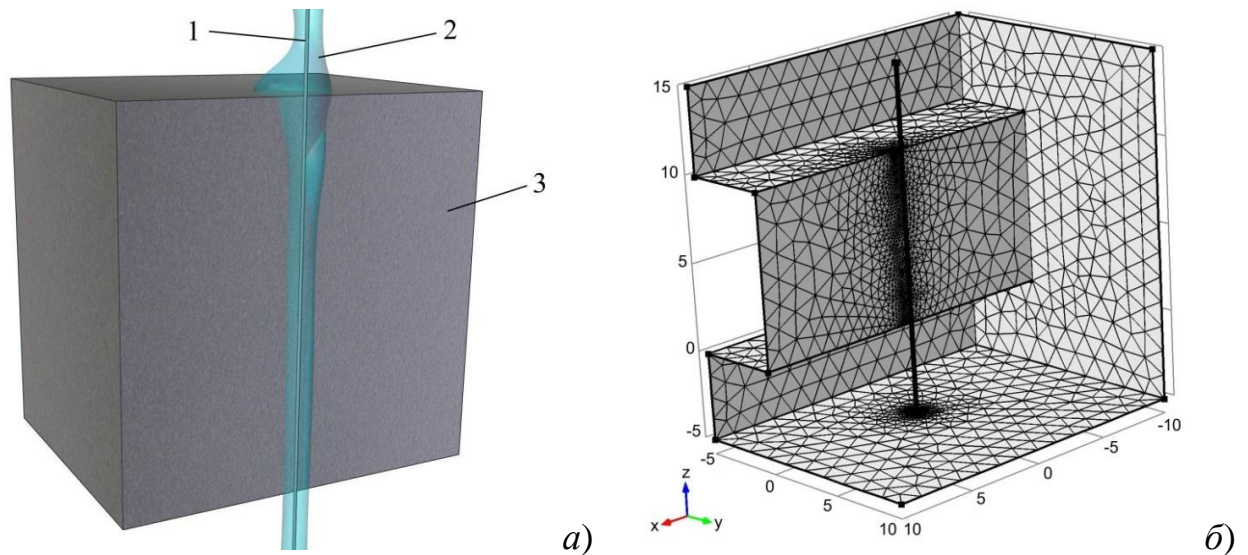


Рисунок 5.4 – Технологічна схема ЕХРО дротяним електродом:
 а) фізична схема: 1 – ДЕІ; 2 – струмінь електроліту; 3 – поверхня деталі, яка обробляється; б) відповідна розрахункова область і її скінченно-елементна сітка

Процес електрохімічної обробки є багатостадійним і надзвичайно складним. Для кращого обчислення було зроблено наступні припущення, які спрощують розрахункову модель. Зміна концентрації електроліту при проходженні реакцій не врахована, тому провідність електроліту прийнята постійною. Температура в зоні обробки постійна і не впливає на швидкість процесу. Коефіцієнт виходу за струмом прийнятий постійним. Тобто вважаємо, що товщина розчиненого шару визначається кількістю електрики, наданої кожній ділянці анода за час обробки, і основним чинником є густина первинного розподілу струму при заданій конфігурації електродів.

На рисунку 5.4, б зображено розрахункову область, її розбиття простою сіткою і заповнення скінченними елементами у формі тетраедрів. Сітка згущена в областях навколо дротяного електрода, міжелектродного проміжку і на поверхнях анода, де слід очікувати максимальної концентрації густини струму. Для визначення електростатичних полів розрахунок проводиться тільки один раз, тому кількість елементів розбиття може бути великою, це не має суттєвого впливу на час розрахунку. При моделюванні проце-

сів розчинення розраховується нестационарна задача, і обчислення проводяться багатократно для кожного кроку по часу, тому кількість скінченних елементів слід вибрати раціонально. Можна, наприклад, при кожному наступному збільшенні щільності сітки порівнювати отримані результати. Якщо вони відрізняються в межах заданої точності, то ущільнення сітки припиняють. Ця властивість притаманна збіжним чисельним методам, до яких відноситься і метод скінченних елементів.

Граничні умови – 0 В на гранях анода, $-U$ В на поверхні циліндричного катода.

Для тестування обчислювальної схеми проводилось порівняння отриманих результатів розрахунку з відомими точними аналітичними розв'язками двовимірних задач. На рисунку 5.5, *a* червона крива відображає результати розподілу густини струму на аноді за аналітичним розв'язком, отриманим за допомогою методу конформних відображень теорії функцій комплексної змінної для конфігурації електродів на площині «катод – круг, анод – півплощина» [217, 232]. Синя крива – розподіл густини струму в перерізі в площині XOY, посередині передньої грані анода, тривимірного електростатичного поля, отриманого чисельним методом. Спостерігаємо точний збіг результатів у зоні активного розчинення. Незначна розбіжність на краях пояснюється тим, що чисельний метод, на відміну від аналітичного, враховує реальну скінченну зону змочування електролітом.

Користуючись результатами розрахунку розподілу густини струму на поверхні деталі в поперечному перерізі, як зображено на рисунку 5.5, *a*, можна контролювати величину зони активного розчинення. Вибір геометричних параметрів катода, анода, міжелектродного проміжку дає можливість впливати в певних межах на локалізацію процесу.

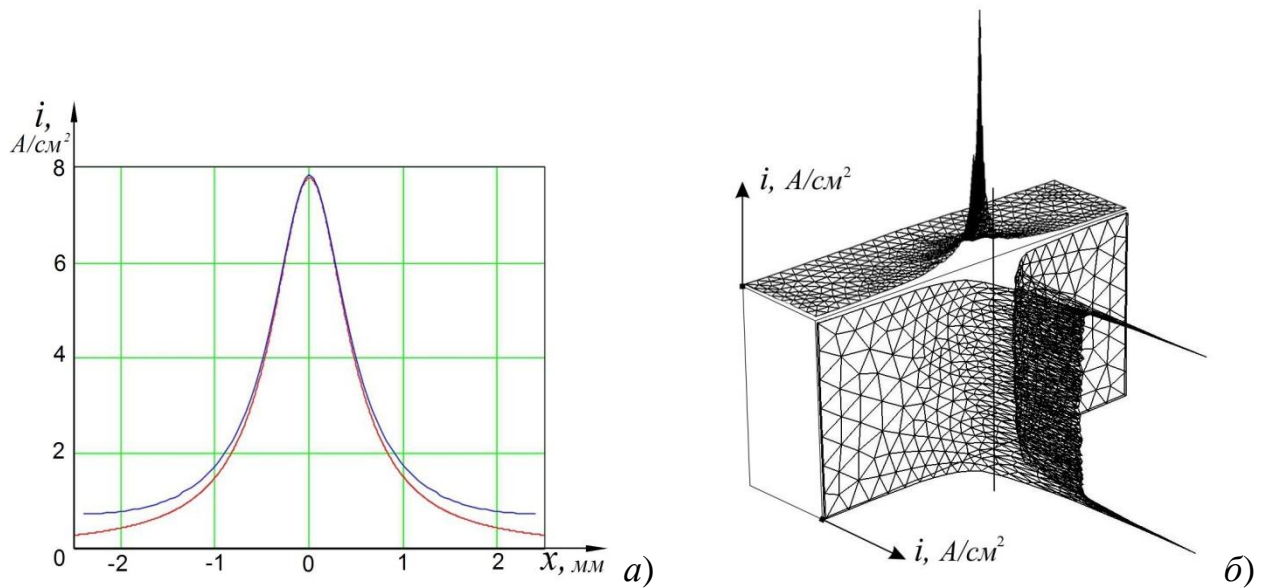


Рисунок 5.5 – Результати розрахунку: *а)* порівняння розподілу густини струму, отриманого з використанням точного розв'язку двовимірної моделі (червона крива) і чисельного розв'язку тривимірної моделі (синя крива); *б)* сіткові графіки розподілу густини струму на передній та верхній гранях анода

Аналіз результатів чисельного розрахунку тривимірного розподілу густини струму на передній та верхній гранях анода (на нижній грані – симетрично) свідчить про двократне збільшення рівня концентрації струму в локальних областях на ребрах анода (рисунок 5.5, *б*). Проведені обчислювальні експерименти показали, що варіація значень діаметра ДЕІ, величини міжелектродного проміжку, висоти анода не змінює зазначеної вище тенденції. На практиці це проявляється в суттєвій нерівномірності швидкості розчинення по висоті деталі. На рисунку 5.6 зображено вертикальну канавку, експериментально отриману внаслідок електрохімічного розчинення поверхні деталі-аноду при дії електричного поля від нерухомого дротяного катоду. Поблизу ребер спостерігається більша площа знятого електроерозійно зміненого поверхневого шару і глибина канавки з самого верху і низу більша, ніж загалом усередині. Розрахунок кількості розчиненого матеріалу зверху і посередині деталі в перерахунку на профілі канавки у відповідних перерізах збігається з експериментальними вимірами з похибкою, що не перевищує 5 %.

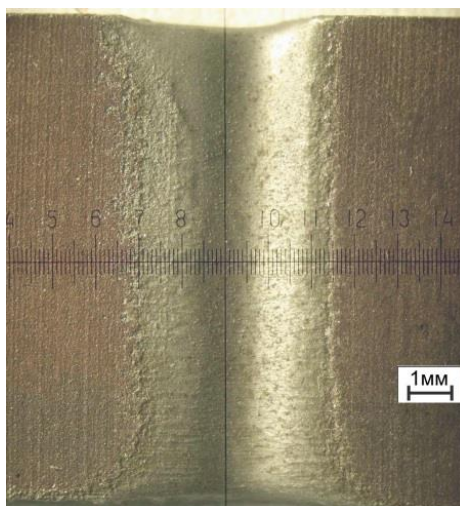


Рисунок 5.6 – Канавка на поверхні деталі, отримана в результаті розчинення при дії електростатичного поля між нерухомим ДЕІ та анодом

Таким чином, за допомогою чисельного моделювання та експериментальної перевірки виявлено проблему посиленого електрохімічного розчинення матеріалу на верхньому та нижньому ребрах анода. Встановлено, що причиною є концентрація розподілу густини струму, зумовлена геометричною будовою граней заготовки, яка є характерною для цієї технологічної схеми ЕХРО ДЕ. Розроблений математичний апарат дає можливість розрахувати точні кількісні параметри розмірів зони та величини концентрації електростатичного поля для подальших дій з метою усунення проблеми.

5.3 Конструктивні та технологічні методи підвищення точності формотворення за розмірної електрохімічної обробки дротяним електродом

Для зменшення нерівномірності розподілу струму по висоті необхідні додаткові конструктивні рішення і технологічні прийоми. Одним із таких рішень є застосування ізолятора (рисунок 5.7, *a*), який обмежує активну довжину катода – дротяного електрода-інструменту. Ізолятор встановлюється на відстані h від верхньої та нижньої граней деталі і, зважаючи на те, що дріт не

перемотується при ЕХРО, ця відстань буде збережена протягом усього технологічного процесу. Техніка нанесення ізолятора на електроди і його експлуатаційна стійкість в умовах взаємодії з електролітами добре описані в літературі [200].

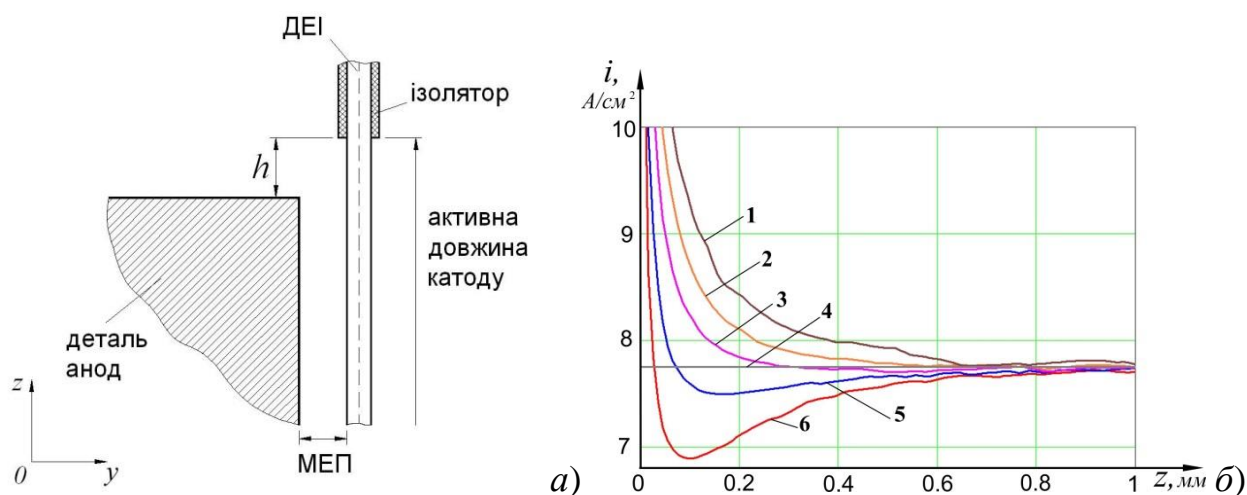


Рисунок 5.7 – Застосування ізолятора при ЕХРО дротяним електродом: а) схема розміщення ізолятора катода; б) розподіл густини струму на передній грані деталі вздовж осі OZ при різних положеннях ізолятора: 1 – без ізолятора; 2 – $h = 0,5$ мм; 3 – $h = 0,25$ мм; 5 – $h = 0,1$ мм; 6 – $h = 0$; 4 – значення густини струму далеко від ребер деталі

Розрахунок електростатичного поля із застосуванням ізолятора дає можливість вибрати найбільш прийнятне значення висоти h при конкретних заданих значеннях інших параметрів. На рисунку 5.7, б зображено результати розподілу густини струму в перерізі в площині YOZ на передній грані анода. Точка $z = 0$ – це точка на ребрі деталі, далі $z > 0$ – вздовж поверхні анода.

Для умов наведеного прикладу доцільно вибрати розташування ізолятора в діапазоні висоти $h = 0,1-0,25$ мм. Величину діапазону вибрано з міркувань можливості дотримання на практиці зазначеного розміру при розташуванні ДЕІ з ізоляторами відносно граней деталі. Наведені висоти відповідають кривим 3 і 5 на графіку розподілу густини струму (рисунок 5.7, б). Так, при $h = 0,1$ мм згідно з розрахунковою кривою 3 отримаємо приблизно

0,3 мм висоти «пошкодженої» ділянки у верхній частині деталі. При $h = 0,25$ мм отримаємо 0,1 мм висоти «пошкодженої» ділянки і незначне (в межах 5 %) зменшення густини струму в прилеглій зоні. В подальшому технологічною операцією плоского шліфування можна зняти з верхньої і нижньої граней деталі встановлену товщину шару. Інший технологічний спосіб полягає в застосуванні накладних листів розрахованої товщини, що затискаються зверху та знизу заготовки і в процесі виготовлення деталі за комбінованою технологією зменшують відкладення латуні при оберненому переносі матеріалу з ДЕІ на стадії електроерозійного різання та відводять з деталі зону підвищеного розчинення при операції електрохімічної обробки.

5.4 Формоутворення циліндричних поверхонь за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом

5.4.1 Комп'ютерне моделювання та експериментальна верифікація геометрії циліндричних поверхонь на етапі електроерозійного дротяного вирізання

При двокоординатному електроерозійному різанні повного зйому дротяний електрод прогинається під дією розподіленого поперечного навантаження, викликаного іскровими розрядами по всій висоті заготовки. Розрахункова схема для визначення форми дротяного електрода (рисунок 5.8) являє собою окремий випадок математичної моделі форми дротяного електрода при чотирикоординатній електроерозійній обробці, наведеної в підпункті 2.2.1.2. У підрозділі 5.1 представлено експериментально-розрахункову методику визначення поперечного навантаження $q(z)$ залежно від режимів різання і матеріалу, що обробляється, в класі інструментальних сталей і твердих сплавів.

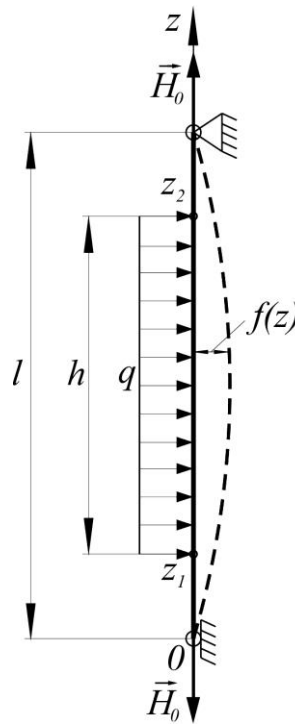


Рисунок 5.8 – Розрахункова схема прогинів дротяного електрода: l – відстань між вузлами фіксації дроту; $h = z_2 - z_1$ – висота деталі, що обробляється; \vec{H}_0 – поздовжній натяг; $q = \text{const}$ – розподілене поперечне навантаження

Для нашого випадку величина прогину дротяного електрода в довільному перерізі ($0 < z < l$) описується формулою

$$f(z) = \frac{q}{2H_0} \left[\frac{z}{l} (l - z_1)^2 - \frac{z}{l} (l - z_2)^2 - (z - z_1)^2 + (z - z_2)^2 \right], \quad (5.4)$$

де необхідно покласти $(z - z_1) = 0$ при $z < z_1$ та $(z - z_2) = 0$ при $z < z_2$.

Для визначення форми поверхні, яку утворює деформований дротяний електрод за переміщення по дузі кола в просторі, розглянемо схему руху окремих точок електрода (рисунок 5.9). Нехай вузли фіксації дроту (точка $M_1(x_1, y_1)$) рухаються по дузі заданого радіуса r_1 (програмній траєкторії). Тоді точка $M_2(x_2, y_2)$, яка знаходиться на висоті z дротяного електрода з відповідним прогином $f(z)$, описує іншу дугу радіуса r_2 . Вектор $\overrightarrow{M_1 M_2}$ спрямований по дотичній до кола в точці M_1 в протилежну сторону вектора швидкості ру-

ху \vec{v} , тобто $\overrightarrow{M_1M_2}$ перпендикулярний вектору \vec{r}_1 . Довжина вектора $\overrightarrow{M_1M_2}$ дорівнює $f(z)$. Тому

$$r_2(z) = \sqrt{r_1^2 + f^2(z)} \quad (5.5)$$

або у вигляді, зручному для моделювання, отримаємо вирази для координат точки M_2 залежно від положення по висоті z ($z_1 < z < z_2$):

$$x_2(z) = f(z) \cdot \frac{y_1}{r_1} + x_1, \quad y_2(z) = y_1 - f(z) \cdot \frac{x_1}{r_1}. \quad (5.6)$$

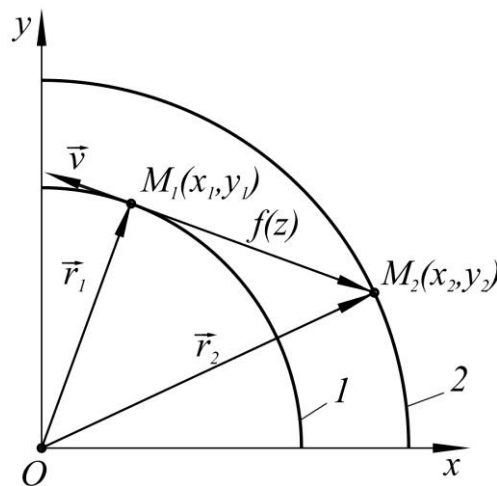


Рисунок 5.9 – Схема руху точок дрітного електрода: 1 – заданий контур руху точок фіксації електрода; 2 – траєкторія руху точки електрода з прогином $f(z)$

Таким чином за встановленою формою дрітного електрода з урахуванням поправки на половину ширини різку, яка для WEDM складається із радіуса дрітного електрода і величини міжелектродного проміжку, будується форма лінійчатої поверхні, отримана внаслідок руху електрода по ділянці дуги заданої траєкторії.

Спираючись на отримані математичні залежності, в середовищі Mathcad виконано серію обчислювальних експериментів з комп'ютерного моделювання процесів формоутворення ЕЕВО дрітним електродом з експериментальною перевіркою окремих результатів. Обчислювальні експеримен-

ти показали, що прогин дротяного електрода суттєво збільшується зі збільшенням відстані між точками фіксації – напрямними електрода. Параметр l входить в (5.4) у степені 2. Це пояснює виникнення проблеми неприпустимої похибки формоутворення при обробці товстих деталей.

Комп'ютерне моделювання формоутворення лінійчатих поверхонь за ЕЕВО деформованим дротяним електродом при різанні в режимі кругової інтерполяції виявило суттєву залежність похибки від радіуса дуги траєкторії. Визначальним є співвідношення товщини заготовки з величиною радіуса дуги – твірної циліндричної поверхні.

На рисунку 5.10 зображено графіки залежності величини максимальних похибок формоутворення циліндричних поверхонь від радіуса дуги програмної траєкторії, по якій рухається дротяний електрод з прогином у процесі WEDM. За допомогою комп'ютерного моделювання встановлено, що при вирізанні циліндричних деталей із заготовки товщиною 40 мм похибка відтворення поверхні внаслідок прогину дротяного електрода не перевищуватиме вимог до точності різання повного зйому для більшості технологічних випадків (крива 1, рисунок 5.10). При вирізанні деталей із заготовки товщиною 68 мм суттєвою стає похибка формоутворення для циліндрів радіусом, меншим 0,5 мм (крива 2).

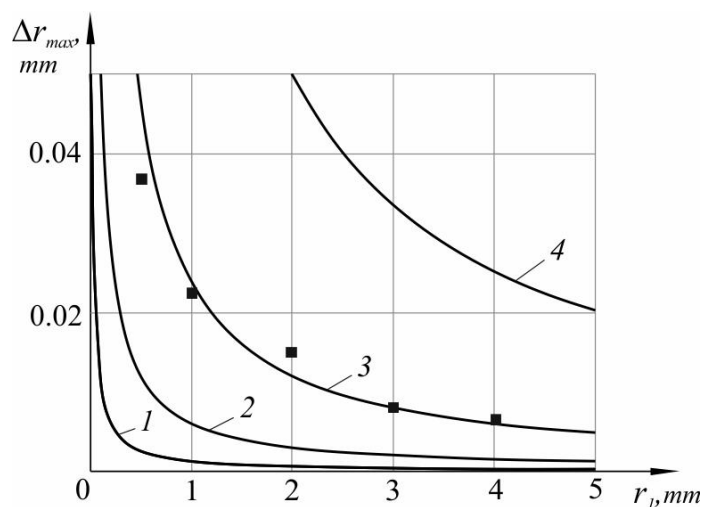


Рисунок 5.10 – Залежність максимальної похибки формоутворення циліндричної поверхні Δr_{\max} від радіуса дуги програмної траєкторії r_1 за різної

товщини заготовки: 1 – 40 мм, 2 – 68 мм, 3 – 100 мм, 4 – 150 мм, ■ – експериментально визначені значення похибок

Зі збільшенням товщини заготовки похибка формоутворення зростатиме. Крива 3 свідчить, що при вирізанні циліндричної деталі радіусом до 1 мм похибка внаслідок прогину дротяного електрода перевищуватиме 20 мкм. Такі значення похибок можуть бути коректно виміряні за допомогою координатно-вимірювальної машини Coordinate Measuring Machine 3D CMM AX-IOM CNC ABERLINK. Вимірювання проводилися на вирізаних циліндрах з фіксованими радіусами основи. Тобто різання здійснювалося по контурах траєкторії з постійними радіусами кривизни. Визначення відхилень від циліндричної форми отриманих деталей проведено за допомогою математичного забезпечення координатно-вимірювальної машини. Максимальна зафіксована розбіжність між результатами обчислень і натурного експерименту не перевищує 8 % (рисунок 5.10). Це підтверджує задовільну точність розрахункової моделі.

Теоретично розрахована крива 4 для товщини заготовки 150 мм показує, що для радіусів 5 мм і менших похибка стає неприпустимо великою.

Наведений приклад моделювання здійснено для вищезазначених матеріалів заготовки та режиму електроерозійного різання за ЕЕВО. Експериментальна перевірка окремих результатів комп'ютерного моделювання з контролем за допомогою координатно-вимірювальної машини опуклостей отриманих циліндричних поверхонь підтвердила задовільну точність моделі.

Для інших технологічних режимів ЕЕВО доцільно скористатися методикою визначення силових факторів, що діють на дротяний електрод, викладеною в підрозділі 5.1, і провести аналогічне моделювання згідно з запропонованим методом.

5.4.2 Засади проектування технологічного процесу електрохімічної розмірної обробки для усунення похибок електроерозійного вирізання циліндричних поверхонь

Швидкість анодного розчинення, а отже і зміна форми, залежить від густини технологічного струму на поверхні деталі. Для електрохімічної комірки з конфігурацією електродів «циліндричний катод – циліндричний анод» необхідно встановити закон розподілу напруженості електричного поля в МЕР і густину струму на поверхні анода. Розрахункову схему зображено на рисунку 5.11. Використовуючи метод конформних відображень теорії функцій комплексної змінної [217], отримаємо вирази для напруженості електричного поля, аналогічно математичній моделі пункту 2.3.2:

$$E_x = A \left(\frac{x}{x^2 + (y-a)^2} - \frac{x}{x^2 + (y+a)^2} \right), \quad E_y = A \left(\frac{y+a}{x^2 + (y+a)^2} - \frac{y-a}{x^2 + (y-a)^2} \right),$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}, \quad (5.7)$$

$$\text{де } a = \sqrt{b^2 + 2bR}, \quad b = \frac{\delta(\delta + 2r_0)}{2(\delta + r_0 + R)}, \quad A = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\ln p_1}, \quad p_1 = \frac{a+b}{a-b} \cdot \frac{a+\delta-b}{a-\delta+b},$$

тут R – радіус циліндричної поверхні анода, r_0 – радіус катода, δ – величина міжелектродного проміжку, φ_0 , φ_1 – потенціали на катоді та аноді відповідно.

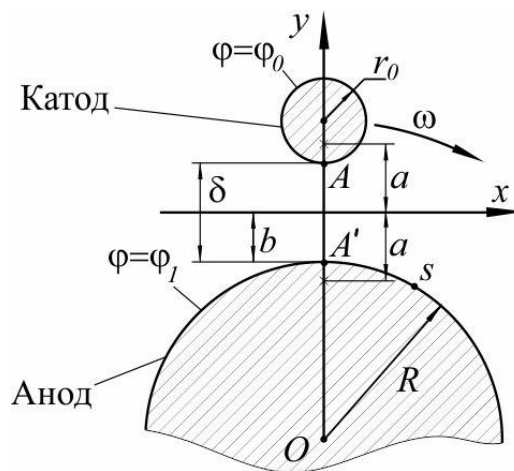


Рисунок 5.11 – Розрахункова схема для визначення густини струму на поверхні циліндричного анода за ЕХРО дротяним електродом

При малих МЕР, характерних для ЕХО дротяним електродом, можна використовувати спрощену формулу

$$E \approx A \frac{2a}{s^2 + a^2}, \quad (5.8)$$

де s – дугова координата, яка відраховується від точки A' (рисунок 5.11).

Максимальне значення напруженості електричного поля

$$E_{\max} = E \Big|_{s=0} = \frac{2(\varphi_1 - \varphi_0)}{a \ln p_1}, \quad (5.9)$$

максимальне значення густини струму на поверхні анода в точці A'

$$j_{\max} = \frac{2\kappa(\varphi_1 - \varphi_0)}{a \ln p_1}, \quad (5.10)$$

де κ – питома провідність електроліту.

Для моделювання формоутворення важливо встановити товщину розчиненого поверхневого шару. Для цього розглянемо обертальний рух дротяного катода навколо анода з кутовою швидкістю ω (рисунок 5.11). Лінійна швидкість руху катода за заданою траєкторією визначається за виразом

$$v = \omega \cdot (R + \delta + r_0). \quad (5.11)$$

Тоді напруженість електричного поля на поверхні анода набуде вигляду

$$E = A \frac{2a}{(s - R \cdot \omega \cdot t)^2 + a^2}. \quad (5.12)$$

За законом Фарадея глибина розчинення в точці A' за час dt

$$d\Delta = K_v \eta j \Big|_{s=0} dt, \quad (5.13)$$

де K_v – коефіцієнт електрохімічного розчинення матеріалу анода, η – коефіцієнт виходу за струмом, j – густина струму.

Проінтегрувавши (5.13) у відповідних границях, знайдемо товщину розчиненого шару за один прохід обробки

$$\int_0^{\Delta_m} d\Delta = 4K_v \eta \kappa A a \int_0^{t_k} \frac{dt}{(R \cdot \omega \cdot t)^2 + a^2}, \quad (5.14)$$

де $t_k = \pi/\omega$, або

$$\Delta_m = 4K_v \eta \kappa A \frac{1}{R\omega} \arctg\left(\frac{\pi R}{a}\right). \quad (5.15)$$

Для потенціостатичного імпульсного режиму ЕХО при $\varphi_1 = 0$, $\varphi_0 = -U$, U – напруга остаточно отримаємо

$$\Delta_m = 4K_v \eta \kappa \frac{U}{R \cdot \omega \cdot \ln(p_1)} \frac{t_i}{t_n} \arctg\left(\frac{\pi R}{a}\right), \quad (5.16)$$

де t_i – тривалість робочого імпульсу, t_n – період імпульсів.

Після електроерозійного вирізання по дузі радіуса R деформованим дротяним електродом отримана поверхня матиме опуклість посередині деталі вздовж осі z (рисунок 5.12). При подальшій ЕХО недеформованим дротяним електродом мінімальний і максимальний МЕР будуть δ_1 і δ_2 відповідно. З аналізу формул (5.7), (5.10), (5.16) випливає, що напруженість електричного поля, густина струму i , як наслідок, інтенсивність анодного розчинення зростають при зменшенні МЕР. Тому посередині деталі матеріалу буде зніматися більше і процес прямуватиме до вирівнювання поверхні по висоті. Тобто при русі дроту по колу радіусом $R + \delta + r_0$ будуть зніматися товщини Δ_{m1} , Δ_{m2} , причому $\Delta_{m1} > \Delta_{m2}$, тому що $\delta_1 < \delta_2$.

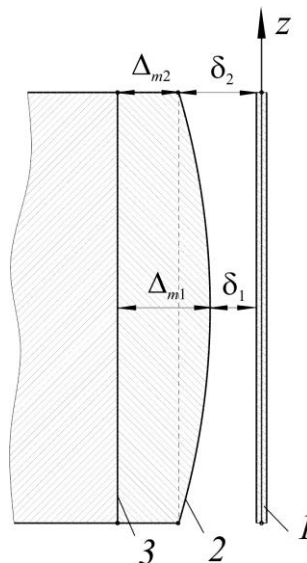


Рисунок 5.12 – Вирівнювання поверхні за допомогою ЕХО після ЕЕВО:
 1 – дротяний електрод; 2 – викривлений профіль поверхні деталі; 3 – вирівняна твірна поверхні деталі

Опукла поверхня стане циліндричною, якщо буде виконуватися рівність

$$\delta_1 + \Delta_{m1} = \delta_2 + \Delta_{m2}. \quad (5.17)$$

Товщину розчиненого шару знаходимо згідно з (5.16), тоді формула (5.17) набуде вигляду

$$\delta_1 + \frac{A_1}{v} = \delta_2 + \frac{A_2}{v}, \quad (5.18)$$

$$\text{де } A_1 = 4K_v \eta \kappa \frac{U}{\ln(p_1)} \frac{t_i}{t_n} \arctg\left(\frac{\pi R}{a_1}\right), \quad A_2 = 4K_v \eta \kappa \frac{U}{\ln(p_2)} \frac{t_i}{t_n} \arctg\left(\frac{\pi R}{a_2}\right).$$

Із (5.18) знаходимо швидкість руху дротяного катода за заданою траєкторією для вирівнювання поверхні в процесі анодного розчинення

$$v = \frac{A_2 - A_1}{\delta_1 - \delta_2}. \quad (5.19)$$

Задача наступної стадії комп'ютерного моделювання процесу вирівнювання циліндричної поверхні за технологією ЕХО дротяним електродом полягає в обґрунтованому виборі амплітудно-часових параметрів імпульсного струму і швидкості руху електрода за траєкторією. Проведені теоретичні розрахунки, моделювання та окремі експериментальні дослідження показали, що вже в початковий момент часу анодне розчинення переважно вирівнює різницю між опуклою частиною посередині висоти циліндричної поверхні і менш випуклими ділянками зверху і знизу (Δ_{m1} та Δ_{m2} відповідно, рисунок 5.12). Далі з плином часу розчинення різниця між Δ_{m1} та Δ_{m2} зменшується і переважним стає більш інтенсивне зняття товщини всього поверхневого шару, ніж вирівнювання поверхні по висоті деталі. Дійсно, з формул (5.7), (5.16) видно, що інтенсивність розчинення залежить від величини напруженості електричного поля, яка на виступах має більше значення. З часом виступи

зменшуються і нерівномірність розподілу напруженості нівелюється. На практиці це означає, що не слід продовжувати процес до повного вирівнювання поверхні, а доцільно зупинитися при досягненні необхідної точності відтворення геометричних параметрів (рисунок 5.13). Це ще раз доводить важливість комп'ютерного моделювання при проектуванні технологічного процесу за комбінованою технологією. Його використання дає змогу прогнозувати величину похибки формоутворення, отриманої після ЕЕВО, і, відповідно, амплітудно-часові параметри імпульсного струму та швидкість руху електрода за траєкторією для зменшення значення похибки до допустимого внаслідок подальшої ЕХРО дротяним електродом.

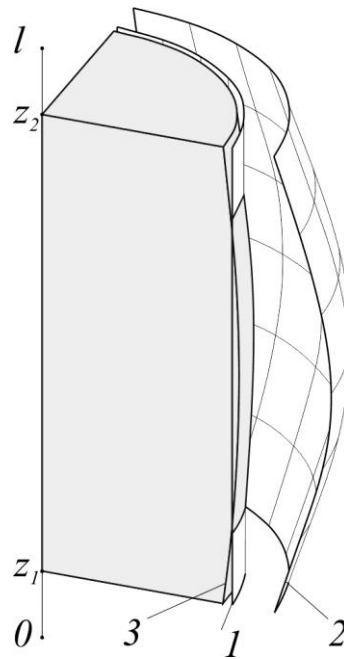


Рисунок 5.13 – Результат формоутворення поверхні за комбінованою технологією: 1 – задана циліндрична поверхня; 2 – поверхня після ЕЕВО; 3 – поверхня, сформована внаслідок ЕХРО

Збільшити інтенсивність переважного розчинення виступів можливо завдяки зменшенню проміжку між дротяним електродом та поверхнею деталі. Тоді більш відчутним стає підвищення концентрації напруженості електричного поля на виступах порівняно з впадинами. Однак встановлювати ве-

личину МЕР, меншу 0,1 мм, не дозволяють вимоги по забезпеченню рівномірного потоку електроліту по всій висоті деталі. Нерівномірне і недостатнє оновлення електроліту в міжелектродному проміжку призводить до зменшення коефіцієнта виходу за струмом (параметр η у формулах (5.13–5.16), (5.18)), що суттєво впливає на формоутворення і, відповідно, на точність його моделювання.

5.5 Формоутворення поверхні кутів за комбінованою технологією електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом

5.5.1 Комп'ютерне моделювання геометрії зовнішніх кутів на етапі електроерозійного дротяного вирізання

Визначення дійсної форми ДЕІ при електроерозійному вирізанні здійснюється за розрахунковою схемою рисунка 5.8 за формулою (5.4). Для конкретних параметрів ЕЕВО $l = 40$ мм, $h = 20$ мм, $H_0 = 6$ Н, $q = 2$ Н/м отримано форму ДЕІ, зображену на рисунку 5.14.

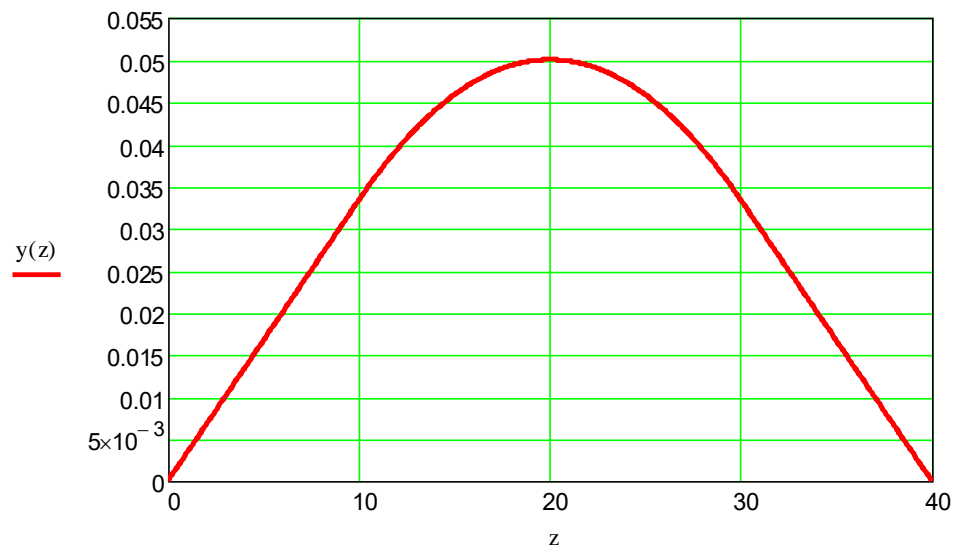


Рисунок 5.14 – Дійсна форма дроту-електрода при заданих параметрах ЕЕВО (розміри в мм)

Побудова форми зовнішнього кута деталі, отриманого ЕЕВО з урахуванням прогину ДЕІ, здійснюється з використанням наступного математичного апарату [233].

Позначимо $f_{2(z)}$ – прогин дроту на висоті різі z ($0 < z < 1$). Він визначається за формулою (5.4), що описує дійсну форму ДЕІ за ЕЕВО. Нехай далі $x_1(t)$, $y_1(t)$ – плинні координати точок фіксації ДЕІ при русі зі сталою швидкістю V за заданою траєкторією, $x_{2(z)}(t)$, $y_{2(z)}(t)$ – координати точки ДЕІ на висоті z .

Тоді закон руху будь-якого перетину дротяного електрода на висоті різі z можна описати за допомогою системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx_{2(z)}(t)}{dt} + K_{(z)}x_{2(z)}(t) = K_{(z)}x_1(t), \\ \frac{dy_{2(z)}(t)}{dt} + K_{(z)}y_{2(z)}(t) = K_{(z)}y_1(t); \end{cases} \quad (5.20)$$

де $K_{(z)} = V/f_{2(z)}$.

Розв'язок системи рівнянь (5.20) при початкових умовах

$$x_{2(z)}(0) = f_{2(z)} \cos \alpha, \quad y_{2(z)}(0) = f_{2(z)} \sin \alpha, \quad (5.21)$$

де $\alpha \neq 0$ – величина кута, що обробляється, має вигляд

$$\begin{cases} x_{2(z)}(t) = f_{2(z)}(1 + \cos \alpha) \cdot e^{-K_{(z)}t} - f_{2(z)} + V \cdot t, \\ y_{2(z)}(t) = f_{2(z)} \sin \alpha \cdot e^{-K_{(z)}t}, \end{cases} \quad (5.22)$$

і описує закон руху будь-якого перетину дротяного електрода на висоті різі z ($0 < z < 1$).

При використанні форми дротяного електрода, зображеної на рисунку 5.14, розраховано за формулами (5.22) форму зовнішнього кута розхилом 90° , яку зображено на рисунку 5.15.



Рисунок 5.15 – Візуалізація розрахованої форми зовнішнього кута розхилом 90° з урахуванням прогину дроту-електрода (стрілками вказаний напрям обходу кута при електроерозійному вирізанні)

Більш інформативним у плані візуалізації кількісних значень похибок при відтворенні заданої форми кута за ЕЕВО є рисунок 5.16.

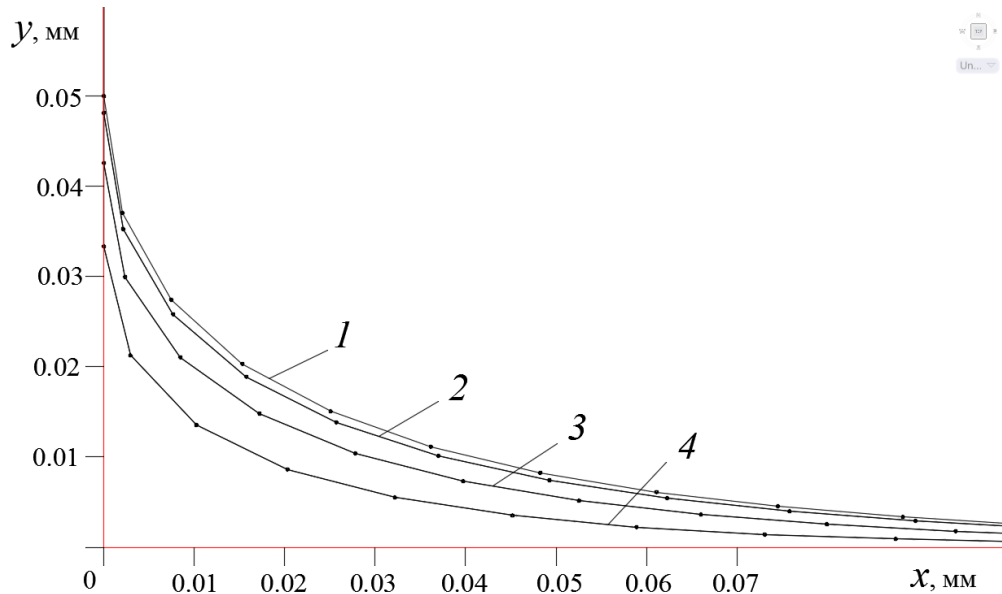


Рисунок 5.16 – Контури профілю, що обмежують форму кутової частини деталі в горизонтальних перерізах на різних висотах: 1 – 10 мм (середина висоти деталі), 2 – 13,3 мм, 3 – 16,7 мм, 4 – 20 мм (верх деталі)

Як видно з рисунка, найбільша ввігнутість деталі спостерігається на середині її висоти, в точці максимального прогину ДЕІ. Максимальна похибка у відтворенні форми в цих технологічних умовах ЕЕВО становить 25 мкм.

5.5.2 Засади проектування технологічного процесу електрохімічної розмірної обробки для усунення похибок електроерозійного вирізання поверхонь зовнішніх кутів

Чисельний розрахунок тривимірних розподілів напруженості електричних полів здійснюється в середовищі сучасних розрахункових програм за методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням диференціальних рівнянь, наведених у пункті 2.3.3.

Розрахунок електростатичного поля ЕХРО при обході ДЕІ навколо кутів деталі, отриманих ЕЕВО з урахуванням похибок формоутворення внаслідок прогину дроту-електрода, сприяє вирішенню двох задач при проектуванні технологічного процесу ЕХРО. Перша задача полягає у виборі параметрів ЕХРО в зв'язку зі зміною конфігурації геометрії деталі. Залежно від поло-

ження ДЕІ на траєкторії руху взаємне розташування граней деталі буде вносити корективи в розподіл густини струму на поверхнях анода, що розчиняються. Друга задача пов'язана з підбором параметрів ЕХРО з метою вирівнювання похибок форми, внесених попередньою ЕЕВО. Для цього необхідний більш точний розрахунок спотворень електростатичного поля в місцях наявності похибок, його аналіз і прийняття рішення про стратегію обробки.

У пункті 2.3.2 наведено математичну модель розподілу електростатичних полів між циліндричним катодом і плоским анодом на основі теорії функції комплексної змінної. На основі аналітичних співвідношень, отриманих у рамках цієї моделі, кількісно визначається лінійний зйом матеріалу анода в кожній точці поверхні залежно від густини струму, часу розчинення (швидкості руху ДЕІ), тобто від кількості електрики, наданої даній точці, та інших параметрів.

Чисельний розрахунок дає можливість уточнити параметри розчинення в кожній точці поверхні анода з урахуванням впливу форми самої поверхні. Причому навіть мікромасштабні зміни форми можуть бути враховані шляхом ущільнення розрахункової сітки МСЕ.

Проведемо моделювання динаміки розподілу електростатичного поля між дротяним катодом і анодом на прикладі ЕХРО при обході ДЕІ навколо зовнішнього кута деталі розхилом 90° .

Розрахунок електростатичного поля проводиться в трьох положеннях дроту-електрода відносно вершини кута (рисунок 5.17). Положення 1 є початковим положенням ДЕІ на траєкторії руху, де необхідно проводити коригування технологічних параметрів у зв'язку з наближенням до зміни форми деталі. Тобто до положення 1 анодне розчинення відбуватиметься в «штатному» режимі між циліндричним катодом і плоским анодом згідно з розрахунками за аналітичними формулами двовимірної математичної моделі. На ділянці між положенням 1 і положенням 2 ДЕІ відчутним є вплив на перерозподіл електричного поля близькості зламу площини поверхні анода та взаємного розташування граней деталі. Необхідне коригування технологічних режи-

мів ЕХРО. В положенні 3 ДЕІ є найбільш віддаленим від анода, і дія електричного струму на грані анода найслабша, але концентрація густини струму поблизу вертикального ребра зростає в кілька разів. При подальшому русі за траєкторією ДЕІ займатиме положення, симетричні положенням 1-3 відносно бісектриси кута, і, очевидно, динаміка зміни електричного поля буде відтворена в зворотному порядку.

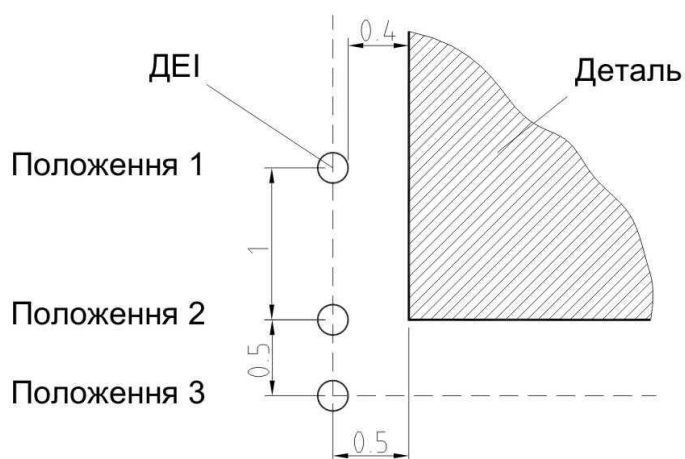


Рисунок 5.17 – Схема взаємного розташування ДЕІ та деталі (вигляд зверху) і положення 1, 2, 3 ДЕІ для проведення розрахунків (розміри в мм)

Розрахункову область, заповнену електролітом, в якій проводиться визначення розподілу електростатичного поля, зображено на рисунку 5.18. Задані потенціали: на гранях анода (деталі) – 0 В, на поверхні катода (ДЕІ) – -4 В.

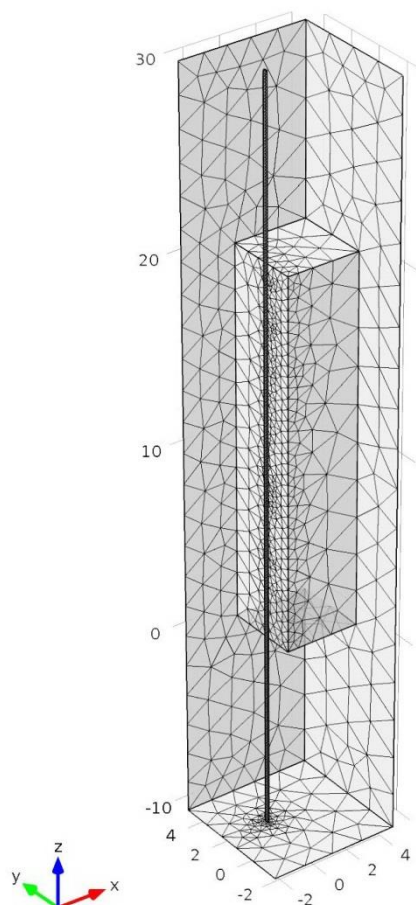


Рисунок 5.18 – Розрахункова область (розміри в мм)

Результати розрахунків у різних характерних положеннях ДЕІ відносно граней кутової частини анода зображено на рисунку 5.19. Збурення електростатичного поля, розтікання розподілу густини струму зі зростанням його значень поблизу верхнього і нижнього ребер можуть бути унормовані із застосуванням ізолятора, що змінює активну зону дрютяного катода за методикою, описаною в підрозділі 5.3. Зміна розподілу густини струму на гранях анода при наближенні ДЕІ до вертикального ребра кутової частини анода свідчить про те, що кількість електрики, яка надається кожній ділянці анода при обході кутів у процесі ЕХРО, не однакова. За допомогою запропонованого обчислювального апарату технологом розробляється стратегія керування швидкістю руху ДЕІ, амплітудно-часовими параметрами імпульсного струму при обході кутів деталі різної величини розхилу для забезпечення рівномірності електрохімічного розчинення поверхневих шарів.

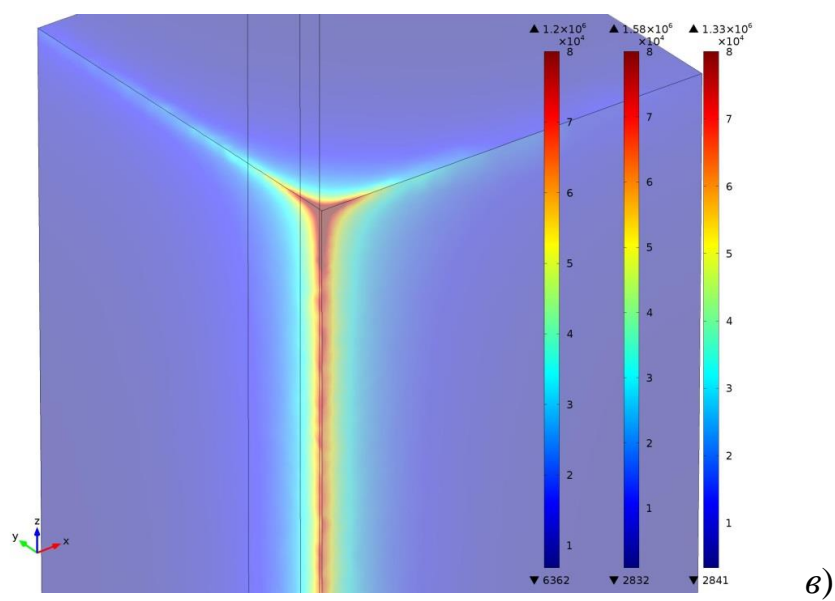
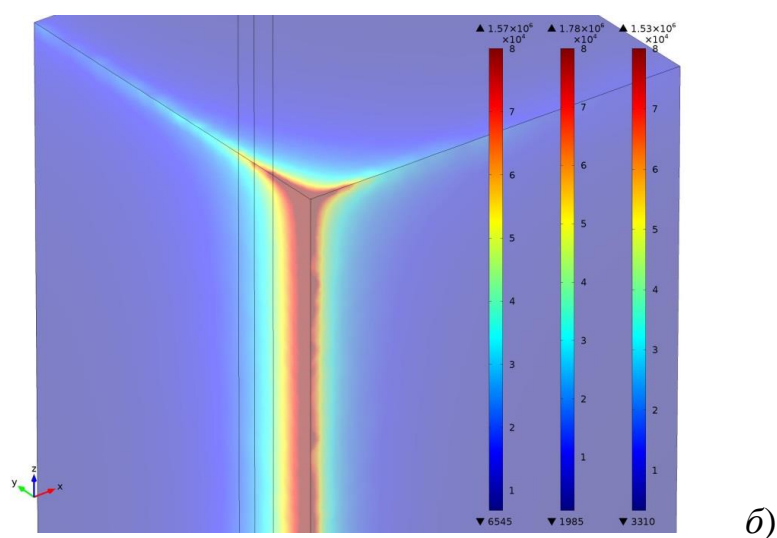
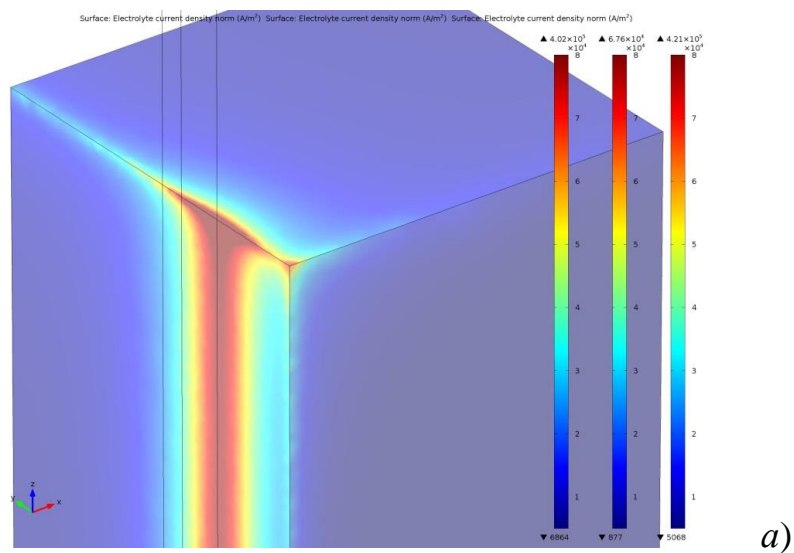


Рисунок 5.19 – Розподіл густини струму на гранях анода при обході ку-
та за ЕХРО дротяним електродом: а) положення 1 ДЕІ; б) положення 2 ДЕІ;
в) положення 3 ДЕІ

Точні кількісні дані, на основі яких приймаються рішення про вибір технологічних параметрів ЕХРО, отримуються з графіків розподілу густини струму вздовж характерних ліній на поверхні анода (рисунок 5.20). По осі абсцис на графіках відкладено координату Y тривимірної системи координат розрахункової області. Координата $y = 0$ відповідає вертикальному ребру кутової частини анода (вершині кута). Координата $y = 1$ знаходиться на грані анода точно навпроти центру ДЕІ в положенні 1 (рисунок 5.17). По червоній кривій (рисунок 5.20) розподілу густини струму на горизонтальному ребрі анода ($z = 0$) оцінюється пікове значення густини струму і ступінь його зменшення з віддаленням від ребра (зелена крива, $z = 0,1$ мм). Синя крива розподілу густини струму посередині висоти анода ($z = 10$ мм) пояснює, чому положення 1 ДЕІ є початком необхідності внесення змін у технологічні режими ЕХРО. За схемою електрохімічного розчинення «плоский анод – циліндричний катод» ця крива повинна мати симетричну форму відносно положення ДЕІ. Вищий рівень лівого плеча синьої кривої (рисунок 5.20) вказує на появу впливу граничних умов на вертикальному ребрі анода. Поблизу ребра ($y = 0$) густина струму становить приблизно $0,25 \cdot 10^5$ А/м², в симетричному відносно ДЕІ місці анода ($y = 2$ мм) густина струму дорівнює $0,16 \cdot 10^5$ А/м². Тобто маємо відмінність близько 50 %. Для активуючих електролітів (типу водних розчинів NaCl) це призведе до різної швидкості розчинення. Для пасивуючих електролітів (NaNO₃), яким властива більша локалізуюча здатність, такий рівень густини струму, що не перевищує 30 % від максимального значення, на якому відбувається анодне розчинення (в цьому випадку – це $0,75 \cdot 10^5$ А/м² у точці $y = 1$), не призведе до активації електрохімічних реакцій.

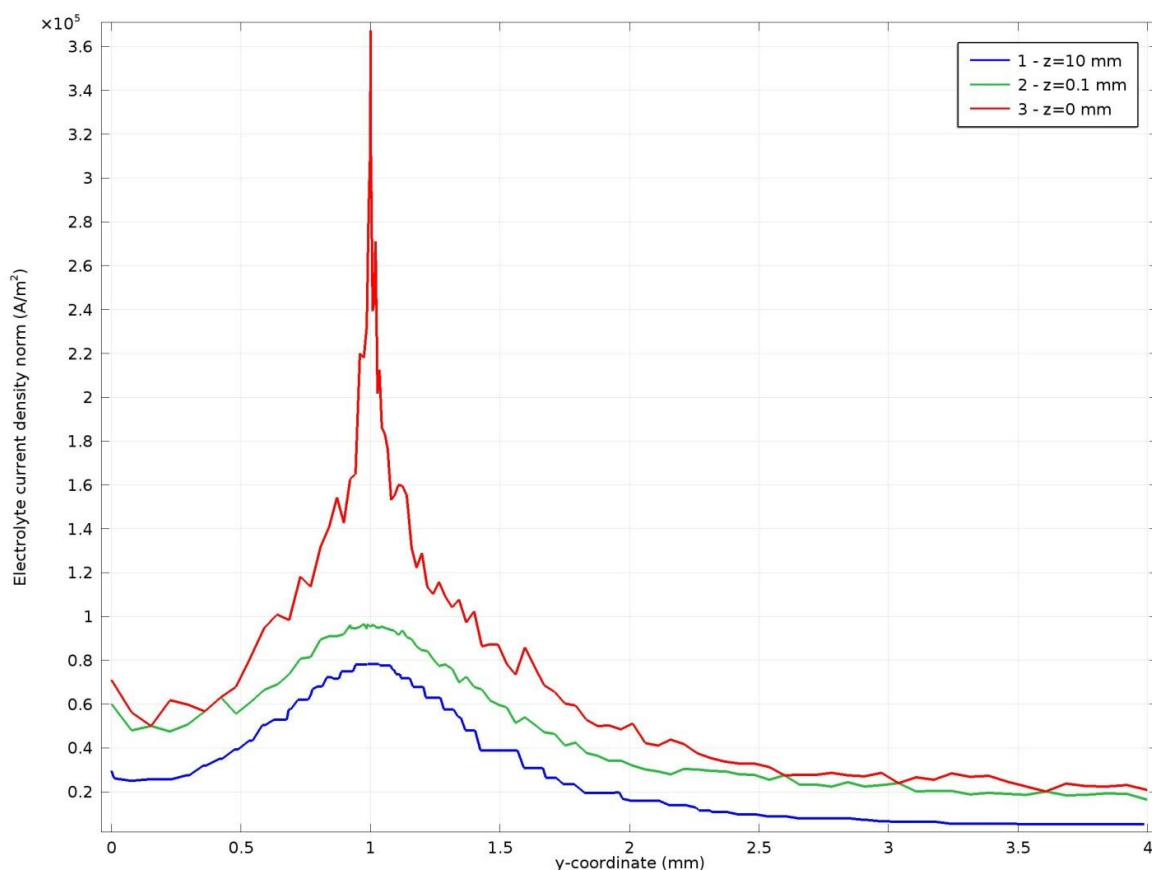


Рисунок 5.20 – Розрахований в модулі Electrochemistry пакету COMSOL Multiphysics розподіл густини струму на грані анода вздовж осі Y на різних висотах у положенні 1 ДЕІ

Аналогічний аналіз результатів моделювання розподілу струму проводиться для наступних положень ДЕІ. Такий порядок дає можливість спроектувати технологічний процес ЕХРО, який відповідає конкретній заданій конфігурації форми деталі, що обробляється. Розроблений технологічний процес береться за основу в подальшому уточненні його параметрів, пов'язаних з урахуванням похибок формоутворення внаслідок попередньої ЕЕВО гнучким дротяним електродом.

У розрахунковий математичний пакет вводиться уточнена частина форми анода, де, за результатами попередніх розрахунків процесу формоутворення за ЕЕВО (пункт 5.5.1), встановлено суттєве відхилення від заданих параметрів точності відтворення форми (рисунок 5.21). Проводиться розраху-

нок розподілу густини струму на поверхні анода з використанням ущільненої сітки MSE.

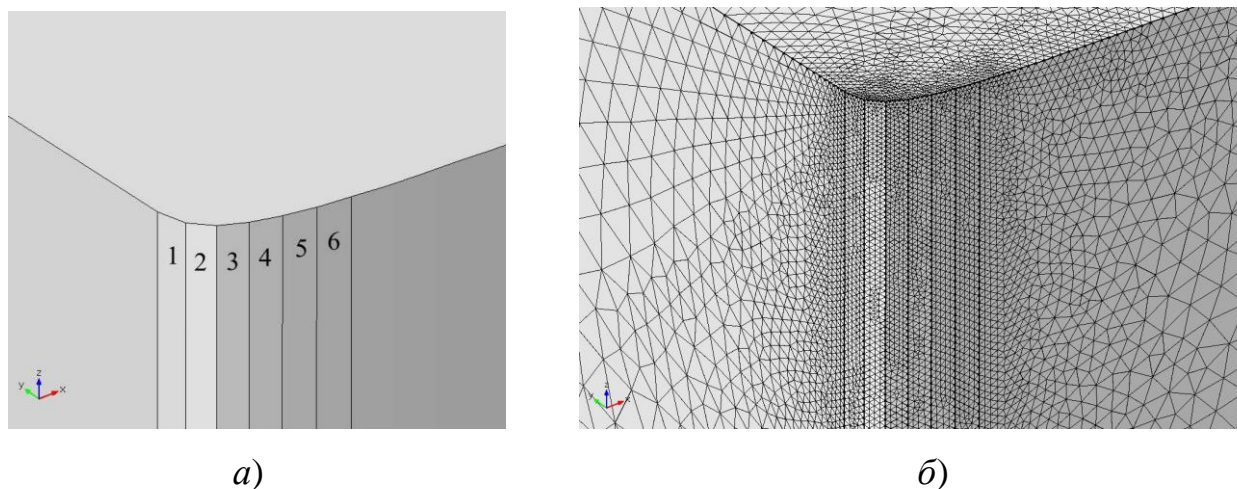


Рисунок 5.21 – Уточнена форма кутової частини деталі з розхилом кута 90° , отримана внаслідок ЕЕВО гнучким дротяним електродом: а) умовна нумерація граней; б) ущільнення розрахункової сітки MSE

Результати розрахунку в положенні 2 ДЕІ зображено на рисунку 5.22. Як видно з графіків, на гранях 1-3 отримано вищі значення густини струму завдяки ближчому їх розташуванню до ДЕІ. Причому на 1 та 2-й гранях спостерігається нерівномірний розподіл густини струму по висоті z . Більші значення сили струму зверху і знизу граней порівняно з серединою будуть сприяти вирівнюванню ввігнутої форми граней до більш прямолінійної завдяки більшій місцевій швидкості анодного розчинення зверху і знизу деталі. Для досліджуваного положення 2 ДЕІ на гранях 4-6 спостерігається не вигідний характер розподілу густини струму по висоті, хоча загальна величина густини струму тут менша. Виходячи з аналізу, можна зробити висновок, що в цьому прикладі доцільно використати двокомпонентний водний розчин активуючого та пасивуючого електролітів у певній пропорції так, щоб активація електрохімічного розчинення поверхні анода починалася за густини струму приблизно $1,5 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$. Тоді на гранях 4-6 розчинення не відбуватиметься. На інших, прямолінійних ділянках траєкторії руху ДЕІ необхідне пе-

ревищення густини струму в $1,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$ досягається шляхом збільшення амплітуди імпульсів струму для гальваностатичного режиму обробки чи напруги для потенціостатичного режиму.

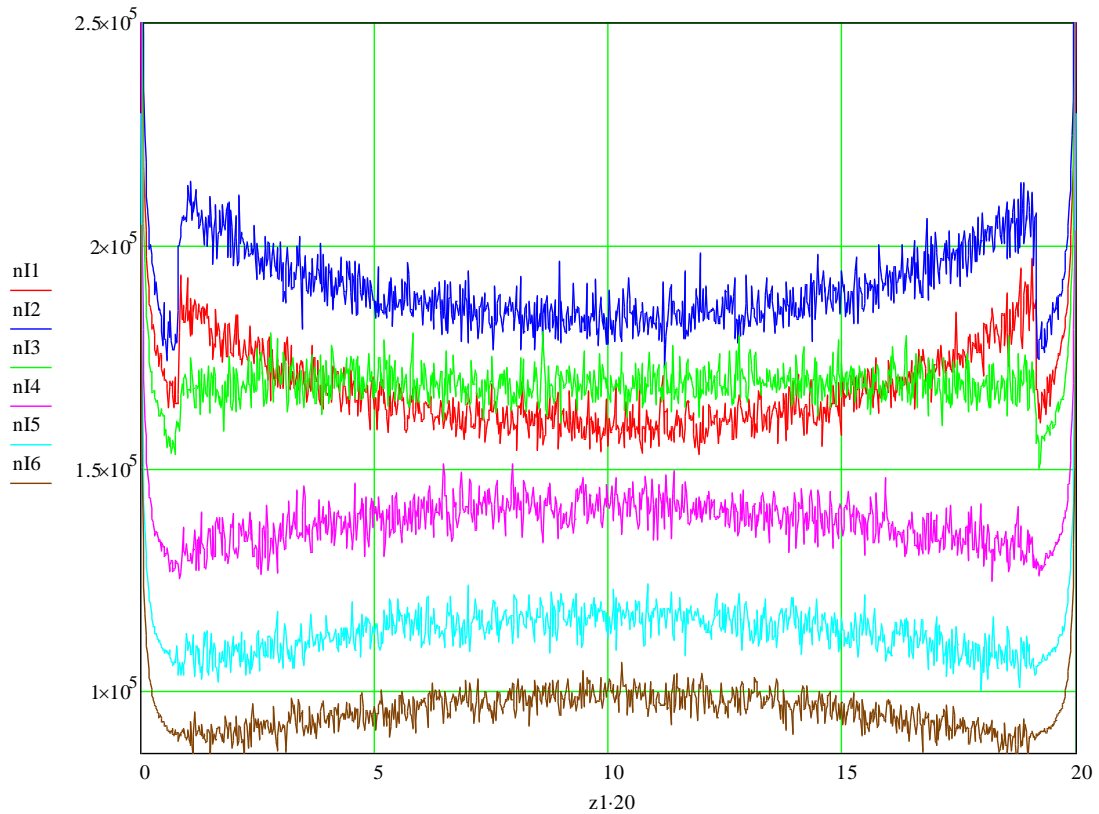


Рисунок 5.22 – Графік розподілу густини струму nI (A/m^2) вздовж вертикальної лінії посередині ввігнутих граней 1 – 6

Таким чином, використовуючи розрахунковий інструментарій визначення дійсної форми деталі після електроерозійного вирізання, визначення розподілу густини струму на поверхнях анода, підбираються склад електроліту, режими руху ДЕІ та амплітудно-часові характеристики технологічного імпульсного струму за ЕХРО так, що забезпечується кероване рівнотовщинне електрохімічне розчинення поверхневих шарів деталі з контрольованим формуванням.

Висновки за розділом 5

1. На основі комплексу експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано розрахунково-експериментальну методику й отримано рівняння для розрахунку величини розподіленого зовнішнього навантаження, що діє на дріт при різанні певних груп сталей і твердих сплавів. Отримані результати дають змогу на етапі проектування технологічного процесу розрахувати дійсну форму дротяного електрода і, з її урахуванням, будувати технологію обробки та відповідну траєкторію руху приводів верстата.

2. Розроблено і випробувано методику математичного комп'ютерного розрахунку розподілу густини технологічного струму в тривимірній постановці для конфігурації «плоский анод – циліндричний катод», яка допомагає прогнозувати точність формоутворення при проектуванні процесу обробки за комбінованою технологією послідовного застосування ЕЕВО ДЕ та ЕХРО. Використання результатів моделювання дає можливість визначити припуски на товщину заготовки для повного усунення зон підвищеного електрохімічного розчинення на гранях деталі.

3. Запропоновано технологічний прийом з використанням ізоляторів на ДЕІ, який при застосуванні разом з математичним апаратом розрахунку електростатичних полів зменшує величину зони нерівномірності розподілу густини струму на гранях заготовки і, відповідно, припуск на усунення зон підвищеного електрохімічного розчинення.

4. Спираючись на розроблені розрахунково-експериментальні методики та математичні моделі базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом, створено методологію проектування технологічних процесів формування елементів складноконтурних поверхонь з заданою точністю при використанні комбінованої технології електроерозійної та електрохімічної обробки незмінним дротяним електродом в одній технологічній установці.

РОЗДІЛ 6

СТРУКТУРИЗАЦІЯ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЯК ОСНОВА ПРОЕКТУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ З ЗАДАНИМИ ТА КОНТРОЛЬОВАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЕТАЛЕЙ

6.1 Загальна структурна схема системи автоматизованого проектування технологічних процесів за комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом

Результати проведеного комплексу експериментальних і теоретичних досліджень покладено в основу системи автоматизованого проектування технологічних процесів за комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

Для впровадження розробленої технології у виробництво проведено систематизацію задач проектування технологічного процесу і, відповідно, математичних моделей, експериментально-розрахункових методик як інструментарію для вирішення цих задач.

Досвід впровадження технології свідчить про необхідність розробки і застосування комплексного підходу, починаючи з аналізу технічних вимог до асортименту деталей, які необхідно виробляти на підприємстві, наявності та характеристик обладнання і закінчуючи програмними засобами автоматизованого проектування конкретних технологічних процесів.

Важливим є структуризація наукових засад, створених у роботі, послідовність їх застосування, підпорядкованість задачам на стадіях проектування технологічного процесу за ЕЕВО та ЕХРО, їх взаємний вплив та взаємодія з поповнювальними базами технологічних даних, які сприяють накопиченню позитивного досвіду у вирішенні технологічних задач підприємства.

Структурну схему САПР ТП за комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом зображено на рисунку 6.1.

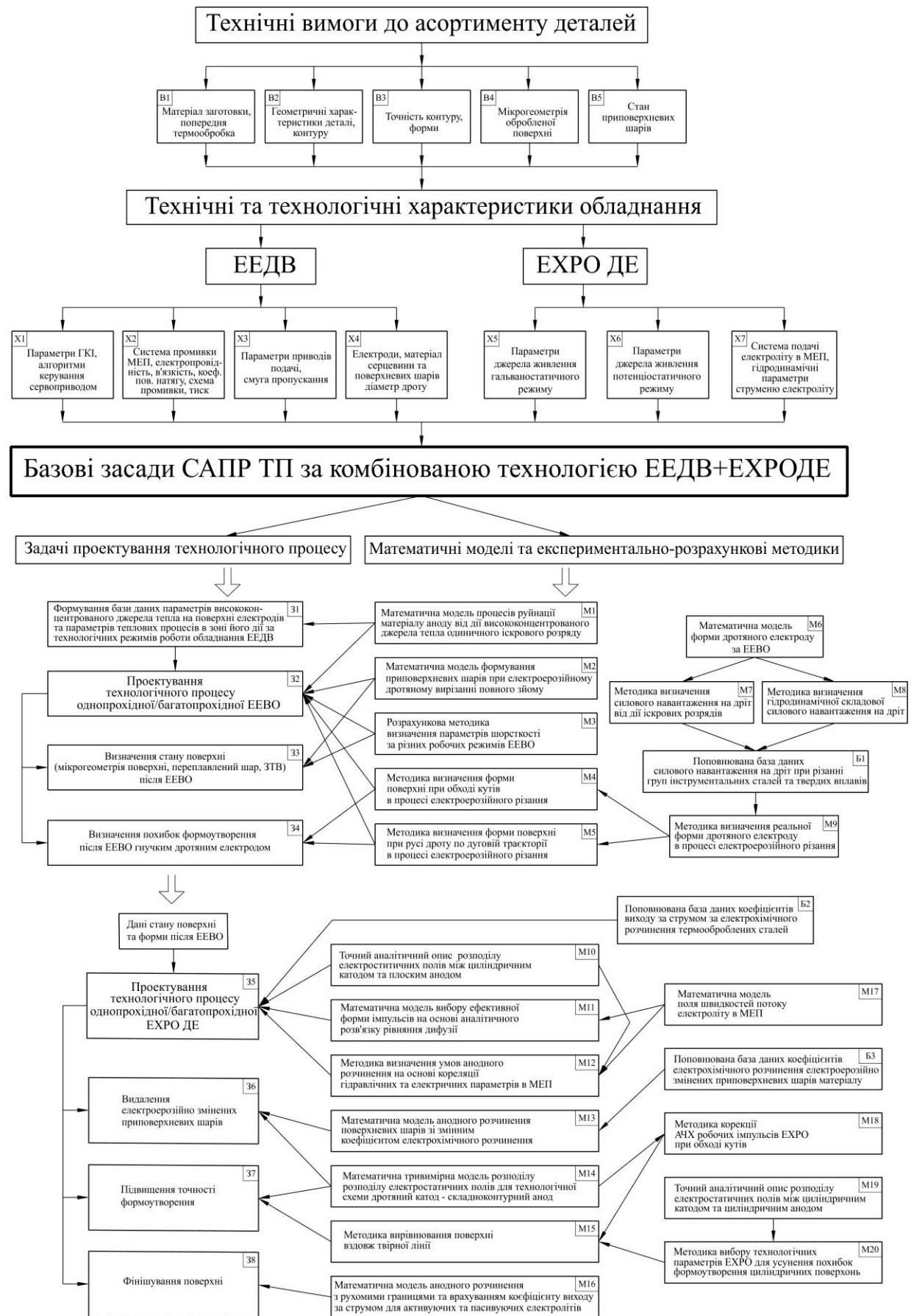


Рисунок 6.1 – Загальна структурна схема САПР ТП за комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дрітним електродом

6.1.1 Технічні вимоги до асортименту деталей та характеристики обладнання

Відправним пунктом при прийнятті рішення про впровадження комбінованої технології електроерозійної вирізної та електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом є технічні вимоги до асортименту деталей, що виробляються на підприємстві та плануються до виробництва в перспективі із застосуванням відповідного верстатного парку. На схемі (рисунок 6.1) вимоги класифіковані блоками В1 – В5.

На електроерозійному обладнанні традиційно виготовляються елементи вирубних штамів, деталі пресформ, інструментальна оснастка. Тому як матеріали використовуються інструментальні сталі, переважно попередньо термооброблені, на прикладі яких у роботі проведено дослідження і розроблено методики та засоби для проектування процесів їх обробки.

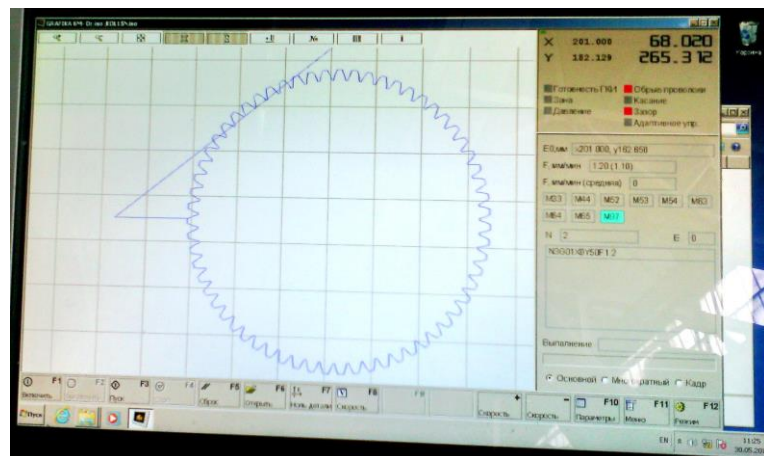
Водночас останнім часом асортимент деталей, що виготовляються за електроерозійною вирізною технологією, значно розширюється. ЕЕВО знаходить застосування і часто є незамінною в машинобудуванні, літакобудуванні, космічній галузі. З'являється необхідність в обробці новітніх матеріалів. Багато публікацій присвячено підвищенню продуктивності та якості електроерозійної вирізної обробки нікель-хромових жароміцних сплавів сімейства Inconel [79, 104, 110]. Сформульовані в дисертаційній роботі наукові застави комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом можуть служити базисом для розробки і проектування технологічних процесів, у тому числі й для цих матеріалів.

Геометричні характеристики деталей, задана згідно з ТЗ точність відтворення форми деталей тощо формують, у свою чергу, вимоги до технічних і технологічних характеристик електроерозійного обладнання (блоки Х1-Х4, рисунок 6.1). Застосування лінійних двигунів з газовим змащенням напрямних в електроерозійних верстатах вітчизняного виробництва марки СЕЛД дає можливість задовольнити діапазон вимог по точності виготовлення деталей за ЕЕВО на рівні світових стандартів. Цьому сприяють новітні розробки сис-

тем керування лінійними двигунами (в тому числі й трифазними) з широкою смугою пропускання (рисунок 6.2).



а)



б)

Рисунок 6.2 – Загальний вигляд верстата для комбінованої обробки (а) з новою сучасною системою ЧПК (б)

На продуктивність ЕЕВО, мікрогеометрію обробленої поверхні та стан приповерхневих шарів впливають параметри генератора коротких імпульсів, що використовується у складі електроерозійного верстата. На жаль, найкращі світові зразки генераторів недоступні для широкого використання на вітчизняних підприємствах через їх високу вартість. Альтернативою їм слугує новий вітчизняний генератор МГКІ-1, спроектований для реалізації розробле-

них алгоритмів керування енерговиділенням у МЕП при проходженні іскрових розрядів [233].

Для реалізації стадії електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом до електроерозійного обладнання пропонується доукомплектація джерелом живлення і системою підготовки та подачі електроліту (блоки Х5-Х7, рисунок 6.1).

Для технологічної схеми із застосуванням тонких дротяних катодів з відповідно невеликою площею взаємодії з анодом є можливість реалізувати сучасні ефективні режими ЕХРО мікросекундними імпульсами надвисокої густини струму. При цьому достатньо застосування джерел струму порівняно невисокої потужності (рисунок 6.3).

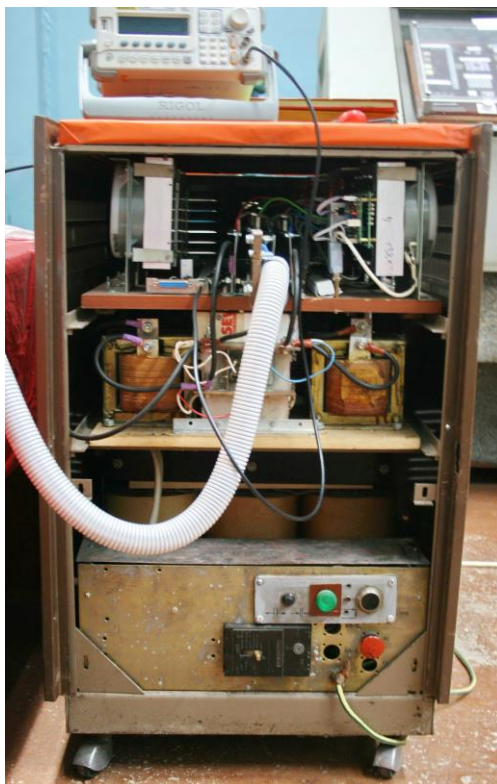


Рисунок 6.3 – Загальний вигляд блока живлення для комплектації електроерозійного вирізного верстата з метою реалізації ЕХРО незмінним дротяним електродом

Спеціальних конструктивних рішень, спрямованих на зменшення індуктивності підвідних проводів, вимагають параметри крутизни наростання і спадання фронтів коротких імпульсів струму з високою амплітудою, які реалізуються із застосуванням сучасної елементної бази електронних комплектуючих.

6.1.2 Стадія технологічного процесу електроерозійного дротяного вирізання

Проектування технологічного процесу ЕЕДВ полягає у вирішенні задач 31-34 загальної схеми рисунка 6.1.

З використанням математичної моделі процесів руйнації матеріалу анода від дії висококонцентрованого джерела тепла одиничного іскрового розряду формується база даних параметрів теплових процесів у зоні дії розряду за штатних режимів роботи генератора електричних імпульсів, що використовується в складі конкретного обладнання ЕЕДВ, та інших технологічних умов, типових для ряду задач, які виконує це обладнання.

Розрахунки з використанням математичної моделі формування приповерхневих шарів при електроерозійному дротяному вирізанні повного зйому та наступних електроерозійних проходів і розрахункова методика визначення параметрів шорсткості за різних робочих режимів ЕЕВО дають можливість вибрати стратегію застосування однопрохідної чи багатопрохідної ЕЕВО відповідно до необхідного стану мікрогеометрії обробленої поверхні, товщини переплавленого шару, параметрів зони термічного впливу.

Залежно від складності контуру вирізання, вимог технічного завдання визначаються місця можливих похибок формоутворення і обчислюється їх значення за методиками визначення дійсної форми поверхні при обході кутів та русі дроту за дуговою траєкторією в процесі електроерозійного різання, які, в свою чергу, базуються на математичних моделях М6-М9 та базі даних Б1 (рисунок 6.1).

В результаті застосування інструментарію проектування технологічного процесу оператор отримує дані стану поверхні та форми деталі після ЕЕВО, які використовуються для проектування наступної стадії ЕХРО ДЕ.

6.1.3 Стадія технологічного процесу електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом

Технологічний процес електрохімічної розмірної обробки дротяним електродом також може бути однопровідним або багатопровідним і включає виконання задач видалення електроерозійно змінених приповерхневих шарів, підвищення точності формоутворення, фінішування поверхні (задачі 36-38, рисунок 6.1).

Слід відзначити, що технологічний процес ЕХРО є досить складним. Електрохімічне розчинення визначається багатьма параметрами, вплив яких не може бути проігнорований на стадії проектування. Умовно їх можна розділити на три групи.

До першої групи відносять вхідні параметри, які не можна змінити. Це геометричні параметри деталі та вимоги технічного завдання до точності їх відтворення, матеріал заготовки і його мікроструктурна будова внаслідок попередньої термообробки, вимоги до вихідних параметрів поверхні. Параметри стану поверхні та форми після ЕЕВО також є вхідними параметрами, але їх можна змінювати в певних межах на стадії проектування ЕЕВО.

Друга група технологічних параметрів вибирається оператором за проектування ЕХРО, але не змінюється протягом виконання процесу обробки. Це вибір складу, концентрації, температури електроліту, тиску в системі подачі електроліту, параметрів сопла і висоти його розміщення над верхньою гранню деталі, застосування змінної довжини активної частини катода та ін. Також до цієї групи параметрів відносять діаметр дротяного електрода та величину МЕР, яка вибирається окремо для кожного проходу. Вибір параметрів цієї групи, який забезпечував би максимальну ефективність обробки, ґрунтується на використанні математичних моделей на основі чисельних мето-

дів, які потребують значного апаратно-обчислювального ресурсу. Можливе проведення уточнюючих експериментів згідно з розробленими в роботі методиками з використанням електрохімічних комірок у разі необхідності обробки нових матеріалів, модернізації технологічної схеми, переходу, наприклад, до мікрообробки та ін.

Дієвим є використання інструментарію поповнювальних баз технологічних даних. Так, наприклад, математична модель анодного розчинення з рухомими границями та врахуванням коефіцієнта виходу за струмом для активуючих та пасивуючих електролітів (пункт 2.3.4 цієї роботи та, відповідно, модель M16 на схемі рисунка 6.1) використовує чисельний розв'язок у розрахунковому модулі САПР. Вона застосовується кожний раз для нового складу електроліту, локалізаційні властивості якого визначаються попередньо за експериментами і враховуються з використанням критерію локалізації процесу анодного розчинення при використанні циліндричних дріт'яних електродів (підрозділ 4.1). Також ця математична модель використовується для визначення величини необхідного припуску на операції фінішування поверхні на основі розрахованих даних зменшення шорсткості поверхні і зміщення границі поверхні анода внаслідок електрохімічного розчинення. Надалі, за використання такого ж складу електроліту і подібних параметрів шорсткості, можливе використання параметрів обробки з бази даних, що значно підвищує продуктивність проектування технологічного процесу ЕХРО.

До третьої групи технологічних параметрів ЕХРО ДЕ відносять «оперативні» параметри – амплітудно-часові характеристики імпульсів та швидкість руху дріт'яного електрода за траєкторією. Шляхом вибору їх значень фактично відбувається керування процесом анодного розчинення через дозування наданої кількості електрики та її зміни в часі для кожної ділянки поверхні деталі, що обробляється. Проектування процесу відбувається за використання математичних моделей M10 та M11 (рисунок 6.1): точний аналітичний опис розподілу електростатичних полів між циліндричним катодом та плоским анодом і математична модель вибору ефективної форми імпульсів

на основі аналітичного розв'язку рівняння дифузії. Кількісні розрахунки за аналітичними формулами відбуваються швидко, і це не тільки забезпечує високу продуктивність проектування технологічного процесу, але й дає можливість створення алгоритмів роботи і реалізації мікропроцесорної апаратної системи для керування процесом ЕХРО ДЕ у режимі реального часу.

Так, на основі методики моніторингу стану міжелектродного проміжку шляхом математичної обробки осцилограм напруга – струм (пункт 2.2.2) з використанням еквівалентної схеми заміщення межі розділу анод – електроліт при імпульсній ЕХРО визначаються електричні параметри МЕР – опір електроліту, ємність подвійного шару, фарадеївський опір у кожний момент часу проходження процесу.

Інформативність цих параметрів та кореляція їх значень зі станом МЕР та «штатним» режимом проходження процесу анодного розчинення перевірялися експериментально на електрохімічних комірках з плоскими електродами, дротяним і плоским електродами в умовах та за методикою, описаними в пункті 2.2.2. Проводилась варіація технологічних параметрів ЕХРО і відстежувались відповідні зміни показників.

При збільшенні амплітуди струму до 9 А і зменшенні величини МЕР до 0,6 мм спостерігається зашламлення МЕР продуктами реакцій з пливом часу. Це добре помітно при аналізі осцилограм (рисунок 6.4). На початку експерименту ємності електрохімічної комірки становлять 0,22 Ф/м² і 0,76 Ф/м² відповідно по передньому і задньому фронтах імпульсу. Через 2 хвилини анодного розчинення візуально спостерігається значне виділення шламу з МЕР, а з обробки осцилограми впливає, що відповідні ємності збільшилися до 0,49 Ф/м² та 1,2 Ф/м² і зменшився опір. Отже, зашламованість МЕР, спричинена недостатньою швидкістю оновлення нерухомого електроліту, добре помітна на знятих осцилограмах і може бути кількісно визначена при їх математичній обробці.

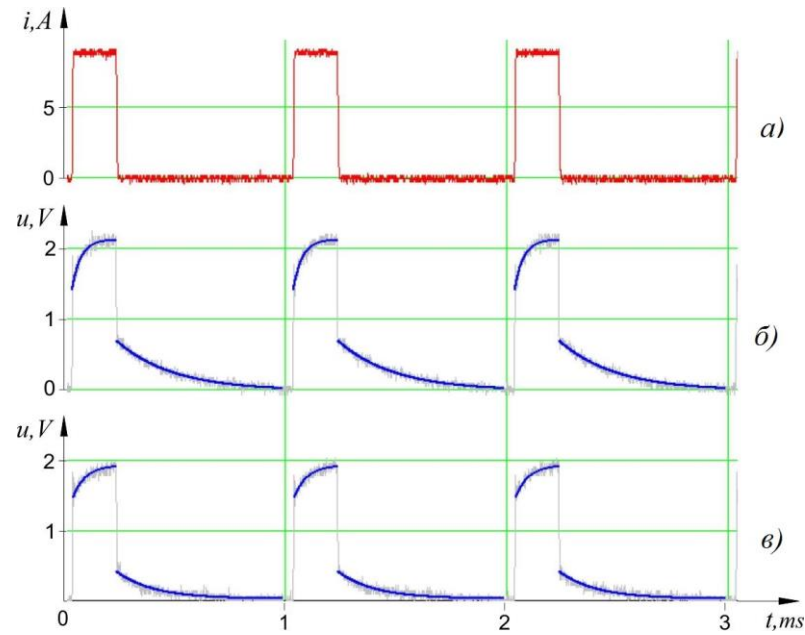
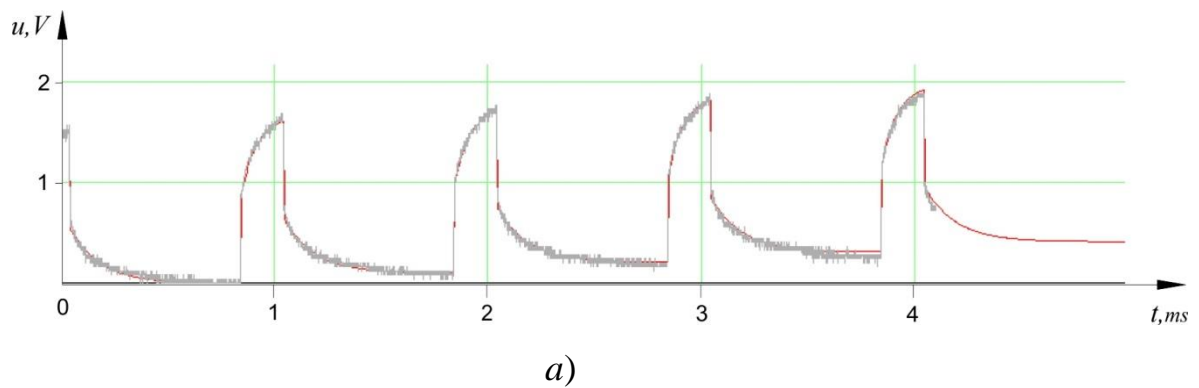


Рисунок 6.4 – Осцилограми, апроксимовані функцією відгуку:
 а) амплітуда струму 9 А; б) напруга на початку експерименту; в) напруга через 2 хвилини з появою зашлямованості МЕР

При варіації параметрів МЕР та АЧПДЖ експериментально отримано інші характерні випадки динаміки зміни поляризації електродів. Осцилограми на рисунку 6.5 математично оброблені наступним чином. По першому імпульсу встановлено параметри опорів і ємності елементів і за формулою (2.21) пункту 2.2.2 прогнозується подальша зміна поляризації на кілька наступних імпульсів (червона крива).



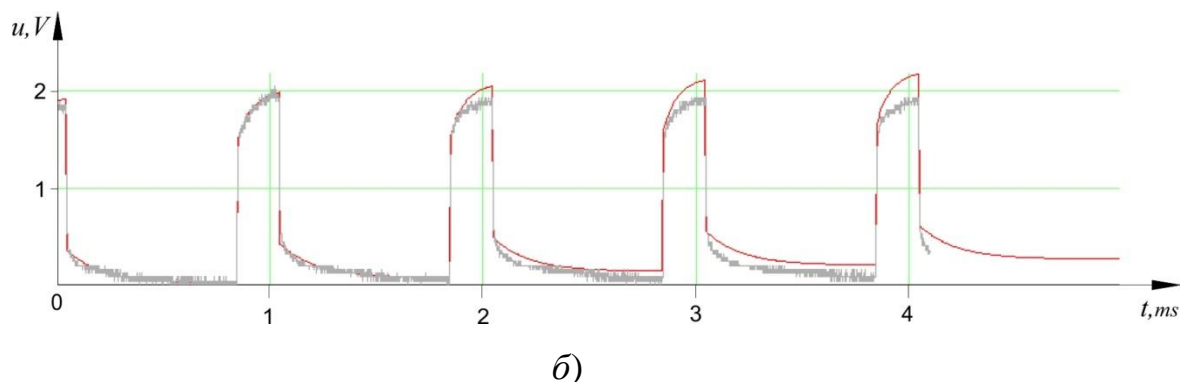


Рисунок 6.5 – Осцилограми з наростанням залишкової поляризації (а), з наростанням поляризації і зміною характеристик МЕР (б)

У першому випадку (рисунок 6.5, а) невдалого вибору АЧПДЖ для умов експерименту спостерігається наростання залишкової поляризації. В іншому прикладі (рисунок 6.5, б) відбувається наростання поляризації і одночасна зміна стану МЕР. Обидва випадки є неприйнятними і потребують негайної корекції АЧПДЖ для налагоджування нормального процесу анодного розчинення в досліджуваній електрохімічній комірці з плоскими електродами. Новітній метод застосування імпульсного живлення дає можливість прискорити деполаризацію та підвищити точність обробки ЕХРО [48].

Для аналізу осцилограм поляризації електродів за технологічної схеми «плоский анод – дротяний катод» необхідно застосувати наступний математичний опис розподілу електричного поля для розрахункової схеми «плоский анод – циліндричний катод» за використання математичної моделі пункту 2.3.2.

Якщо величина потенціалу на катоді дорівнює $u(t)$, то розподіл напруженості поля на поверхні анода визначається за формулою

$$E_y(x, t) \Big|_{y=0} = \frac{2 \cdot a \cdot u(t)}{\ln(p)} \cdot \frac{1}{x^2 + a^2}, \quad (6.1)$$

де $a = \sqrt{H^2 - r^2}$, $p = \frac{a - \delta}{a + \delta}$. Складова напруженості E_x – не суттєва.

Амплітудний струм у ланці може бути представлений наступним чином:

$$I_A = 2 \int_0^{\infty} \kappa \cdot E_y \Big|_{y=0} \cdot L dx = 2\pi L \kappa \frac{U_A}{|\ln(p)|}, \quad (6.2)$$

де κ – питома провідність електроліту;

L – висота деталі.

Тоді опір МЕР, заповненого електролітом,

$$R = \frac{|\ln(p)|}{2\pi L \kappa} \quad (6.3)$$

або

$$R = \frac{a}{\kappa \cdot A_s}, \quad (6.4)$$

де $A_s = \frac{2\pi a L}{|\ln(p)|}$ – еквівалентна площа взаємодії для циліндричного катода і плоского анода, аналогічно площі взаємодії електродів S для плоских електродів.

Площа взаємодії електродів, яка, в свою чергу, визначає електричну ємність електрохімічної комірки, для дрітного електрода має значно менше розрахункове значення, ніж у випадку пари плоских електродів. Тому перехідні процеси наростання і спадання поляризації при дії імпульсного струму візуально менш виражені. На рисунку 6.6 зображено осцилограму анодної поляризації при МЕР 0,5 мм, амплітудному струмі $I_A = 2,34$ А, напрузі $U_A = 11$ В.

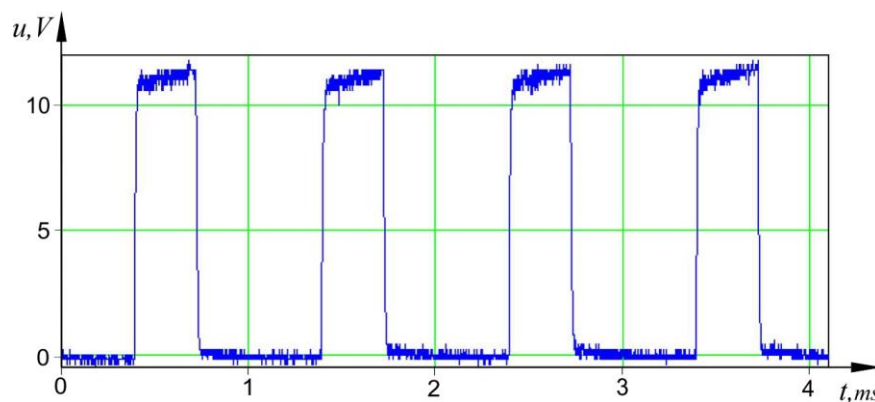


Рисунок 6.6 – Осцилограма анодної поляризації при електрохімічній обробці плоского анода дротяним катодом

На рисунку 6.7 зображено ділянки зростання і спадання напруги цієї осцилограми, апроксимовані функцією відгуку (2.20). Експериментальне значення опору становить 4,7 Ом, теоретично розраховане згідно з формулою (6.3) – 4,33 Ом. Розходження експериментальних і теоретичних результатів становить 7,9 % і може бути пояснене появою часткової загазованості МЕР в результаті електрохімічної реакції, що призводить до зменшення провідності електроліту.

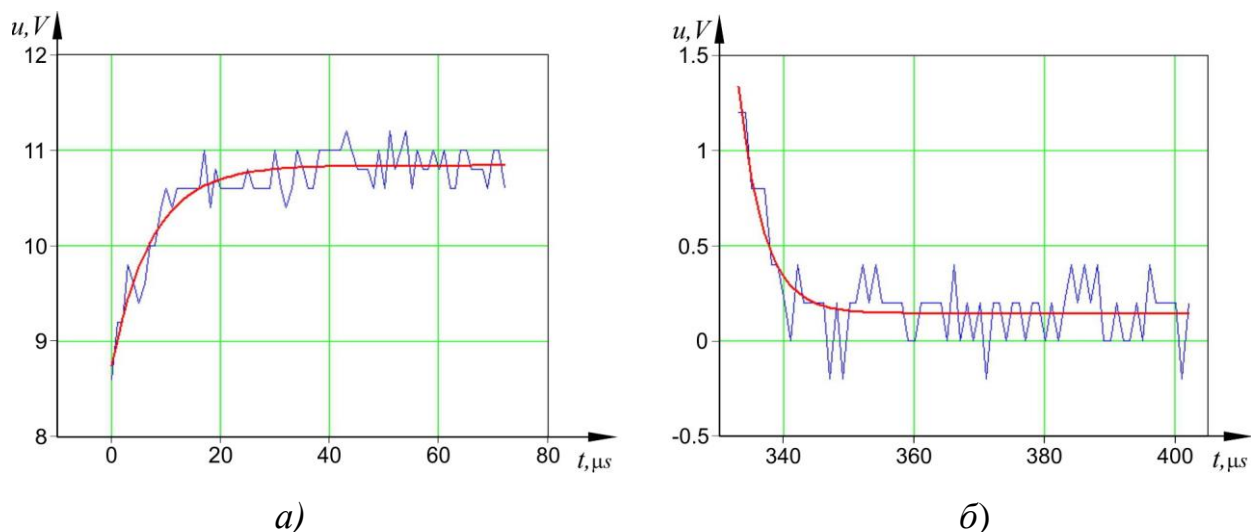


Рисунок 6.7 – Апроксимація функцією відгуку (червона крива) осцилограми напруги (синя крива): а) на ділянці зростання напруги на передньому фронті імпульсу; б) на ділянці спадання напруги на задньому фронті

За результатами апроксимації функцією відгуку переднього фронту ім-

пульсу отримано такі значення: $R_E = 3,74 \text{ Ом}$, $R_F = 0,89 \text{ Ом}$, $C = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$. Питома ємність, тобто ємність електрохімічної комірки відносно еквівалентної площі взаємодії електродів, становить $0,5 \text{ Ф/м}^2$. За даними апроксимації ділянки спадання напруги питома ємність набула значення $0,45 \text{ Ф/м}^2$.

При пролонгації функції відгуку згідно з формулою (2.21) з отриманими параметрами на кілька наступних імпульсів і зіставленні з осцилограмою рисунка 6.6 встановлено, що електрохімічний процес проходить нормально, без суттєвих змін стану МЕП і без накопичення залишкової поляризації. Тобто АЧПДЖ для цих умов підібрані правильно, забезпечуючи необхідну продуктивність знімання металу та уникнення потрапляння процесу в зону пасивації.

Згідно з законом Фарадея отримано вираз для визначення розподілу глибини розчинення матеріалу на поверхні анода внаслідок дії одного імпульсу струму:

$$h(x) = \frac{2 \cdot K_v \cdot \kappa \cdot a \cdot \eta}{\ln(p)} \cdot \frac{1}{x^2 + a^2} \cdot \int_0^T u(t) dt, \quad (6.5)$$

де K_v – коефіцієнт електрохімічного розчинення матеріалу анода;

η – коефіцієнт виходу за струмом;

T – період імпульсу;

$u(t)$ – функція відгуку (2.20), отримана шляхом апроксимації відповідної ділянки осцилограми напруги, при проходженні імпульсу струму.

Якщо процес електрохімічного розчинення проходить стабільно, як у розглянутому прикладі, то за формулою (6.5) можливо розрахувати товщину знятого поверхневого шару, враховуючи швидкість руху дротяного електрода і частоту руху імпульсів струму. У разі відхилення параметрів ЕХО від нормального перебігу реакцій аналіз осцилограми вкаже на неприйнятні зміни. Якщо не застосувати відповідних оперативних заходів щодо корекції АЧПДЖ, то в результаті значно зменшиться коефіцієнт виходу за струмом. Про це свідчать численні експерименти при практичній реалізації технології

ЕХО дротяним електродом.

6.2 Взаємодія основних блоків інтегрованої САПР ТП на прикладі проектування технологічного процесу виготовлення прецизійних деталей магнітної оптики

Загальну схему САПР технологічного процесу, наведену на рисунку 6.1, слід розглядати не як схему конкретного закінченого програмного продукту САПР, а в більш широкому плані базових засад для розробки та модифікації нових технологічних процесів з використанням комбінованої технології електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом. Наведені в роботі математичні моделі, розрахунково-експериментальні методики дають змогу, взявши їх за основу, розширити можливості технології, доопрацювавши в напрямі вимог і технологічних задач, що виникають з розвитком промислового виробництва.

Понад 20 років тому постала технологічна задача виготовлення деталей магнітної оптики – полюсів квадрупольної лінзи для іонного мікроскопа (ядерного мікрозонда). Робоча частина полюсів являла собою лінійчасту поверхню висотою 43 мм, в профілі гіпербола (рисунок 6.8). Матеріал деталі – технічно чисте залізо (ARMCO). Чотири полюси повинні створювати симетричне магнітне поле, яке стискає високоенергетичний потік іонів. Точність виготовлення – до декількох мікронів, шорсткість поверхні – мінімально можлива, тобто досить низька, щоб не викликати збурень магнітного поля, здатних впливати на траєкторію руху частинок. Остаточним, достовірним критерієм дотримання вимог технічного завдання та правильності самих вимог міг служити тільки натурний експеримент з повним виробом у зборі.

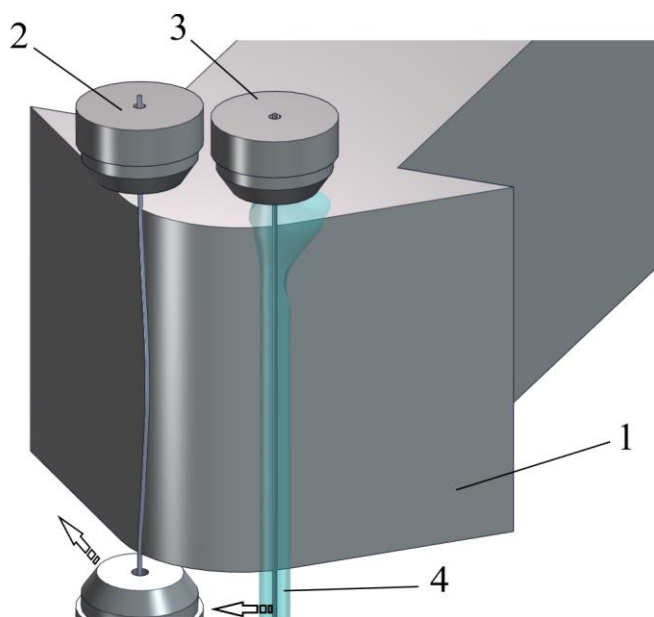


Рисунок 6.8 – Схема послідовної електроерозійної електрохімічної обробки дротяним електродом (масштаб не витриманий): 1 – гіперболічна поверхня полюса квадрупольної лінзи; 2 – перший прохід ЕЕВО; 3 – другий прохід ЕХОДЕ; 4 – струмінь електроліту

Для виготовлення деталей було застосовано багатопрохідну електроерозійну вирізну технологію. Випробування показали стійку роботу виробу з можливістю керування іонним пучком із субмікронною роздільною здатністю (Brazhnik et al, 1995). Згодом періодично виготовлялися ще кілька комплектів деталей магнітних лінз, і кожного разу технологія виготовлення удосконалювалася. На сьогодні це комбінована технологія послідовного застосування електроерозійної вирізної обробки й електрохімічної розмірної обробки тим же дротяним електродом на верстаті за одну установку. Ці дві технології прекрасно доповнюють одна одну, усуваючи недоліки кожної і посилюючи переваги.

Для розробки і реалізації технологічного процесу виконувались наступні завдання з використанням існуючого інструментарію і проведенням певного доопрацювання:

- розробка математичної моделі формоутворення поверхні з урахуванням прогинів дротяного електрода при електроерозійному різанні повного

знімання по гіперболічному контуру на основі моделі формоутворення поверхні при русі дротяного електрода за круговою траєкторією (пункт 5.4.1, блоки М5, М6 схеми рисунка 6.1);

- розробка методики розрахунку швидкості руху електрода та амплітудно-часових характеристик імпульсного струму залежно від кривизни оброблюваної поверхні для забезпечення рівномірності товщини анодного розчинення поверхневого шару (пункти 2.3.2, 2.3.6, 5.4.2, блоки М10, М11, М15);

- проведення експериментальної адаптації комбінованої технології послідовного застосування електроерозійної та електрохімічної обробки для виготовлення прецизійних деталей магнітної оптики (пункти 2.2.2, 5.4.1).

Виконання першого завдання потребує корекції математичної моделі для визначення форми поверхні при русі дроту за дуговою траєкторією в процесі електроерозійного різання в зв'язку з необхідністю вирізання за гіперболічною траєкторією.

Для визначення форми поверхні, яку утворює деформований дротяний електрод при русі по гіперболічному контуру в просторі, розглянемо схему руху окремих точок електрода (рисунок 6.9).

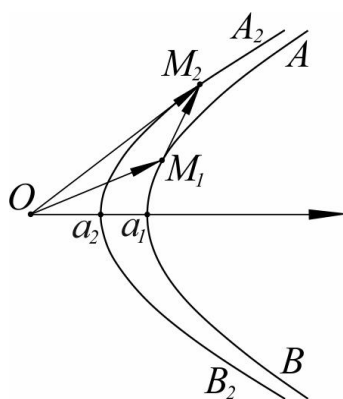


Рисунок 6.9 – Схема руху точок дротяного електрода за гіперболічними траєкторіями: AB – заданий контур руху точок фіксації електрода, A_2B_2 – траєкторія руху точки електрода з прогином $f(z)$

Нехай вузли фіксації дроту (точка M_1) рухаються за гіперболічною траєкторією AB в напрямку від A до B . Тоді точка M_2 , яка знаходиться на висоті z дротяного електрода з відповідним прогином $f(z)$, описує іншу гіперболічну криву A_2B_2 . Вектор M_1M_2 спрямований по дотичній у точці M_1 до гіперболи AB в протилежну сторону вектора швидкості руху. Довжина вектора M_1M_2 дорівнює $f(z)$. Рівняння гіперболи в загальному випадку має вигляд

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (6.6)$$

де a, b – півосі гіперболи.

Зв'язок між півосями a_1, b_1 траєкторії AB і півосями a_2, b_2 траєкторії A_2B_2 визначимо з двох випадків взаємних розташувань точок M_1 і M_2 (рисунок 6.10). З рисунка 6.10, а при використанні рівняння (6.6) випливає

$$f(z) = b_2 \sqrt{\frac{a_1^2}{a_2^2} - 1}.$$

Звідки

$$a_1 = a_2 \sqrt{1 + \frac{f^2(z)}{b_2^2}}. \quad (6.7)$$

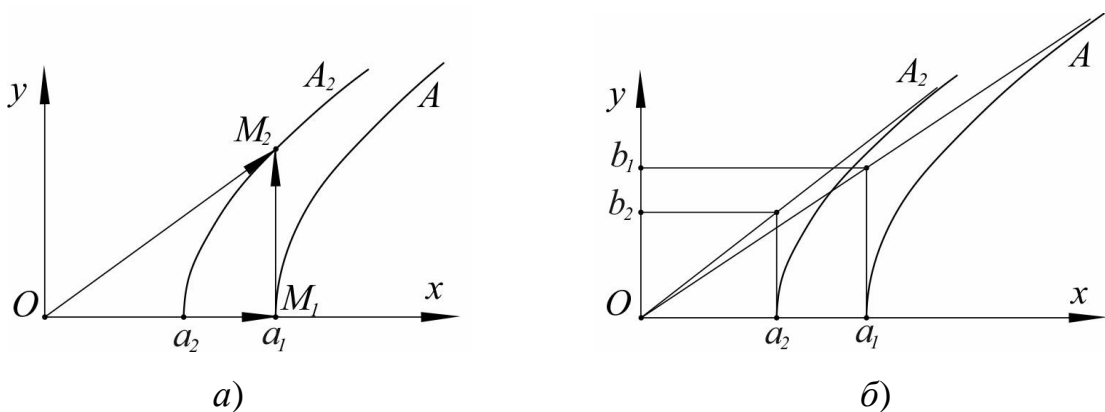


Рисунок 6.10 – Визначення зв'язку між півосями a_1, b_1 гіперболічної траєкторії руху точок фіксації електрода і півосями a_2, b_2 гіперболічної траєкторії руху точки деформованого електрода з прогином $f(z)$

В іншому випадку розташування точок $M_1(x_1, y_1)$ і $M_2(x_2, y_2)$ при $x_1, x_2 \rightarrow \infty, y_1, y_2 \rightarrow \infty$ з використанням рівнянь асимптот $y_1 = \frac{b_1}{a_1} x_1, y_2 = \frac{b_2}{a_2} x_2$

(рисунок 6.10, б) отримаємо

$$b_1 = b_2 \sqrt{1 + \frac{f^2(z)}{b_2^2}}. \quad (6.8)$$

З урахуванням еквідистанти – поправки на половину ширини різку, яка для електроерозійного дротяного вирізання дорівнює сумі радіуса електрода і величини міжелектродного зазору, формули (6.7), (6.8) набудуть вигляду

$$a_1 = (a_3 + e) \sqrt{1 + \frac{f^2(z)}{(b_3 + e)^2}}, \quad b_1 = (b_3 + e) \sqrt{1 + \frac{f^2(z)}{(b_3 + e)^2}}, \quad (6.9)$$

де e – еквідистанта, a_3, b_3 – півосі гіперболічної лінії на виступі деталі, що вирізається на висоті z ($z_1 \leq z \leq z_2$).

Таким чином, за відомою формою дротяного електрода визначаються півосі гіперболічного перетину на обраній висоті z . За ним будується поверхня, яка утворюється внаслідок електроерозійного вирізання по гіперболічному контуру.

Результати розрахунків траєкторії руху дротяного електрода для електроерозійного вирізання гіперболічного контуру згідно з формулами (6.9) показують, що для пологих гіпербол ($a \sim b$) на робочих режимах ЕЕВО з відстанню між вузлами фіксації дроту $l = 25-120$ мм корекція траєкторії для врахування прогинів дроту порівняно невелика. Однак для крутих гіпербол ($a \gg b$) необхідна корекція траєкторії руху дротяного електрода стає істотною. На рисунку 6.11 наведено приклад розрахунку траєкторії руху дротяного електрода за параметрів заданого контуру: $a = 19$ мм, $b = 4$ мм, і технологічних параметрів ЕЕВО: діаметр дроту – 0,2 мм, міжелектродний проміжок – 50 мкм, відстань між вузлами фіксації дроту – 63 мм, товщина деталі – 43 мм, поздовжній натяг дроту – 6 Н, поперечне розподілене навантаження

на дріт від дії іскрових розрядів – $1,2 \cdot 10^{-3}$ Н/мм. Розрахунковий максимальний прогин посередині дрітяного електрода становив 89 мкм.

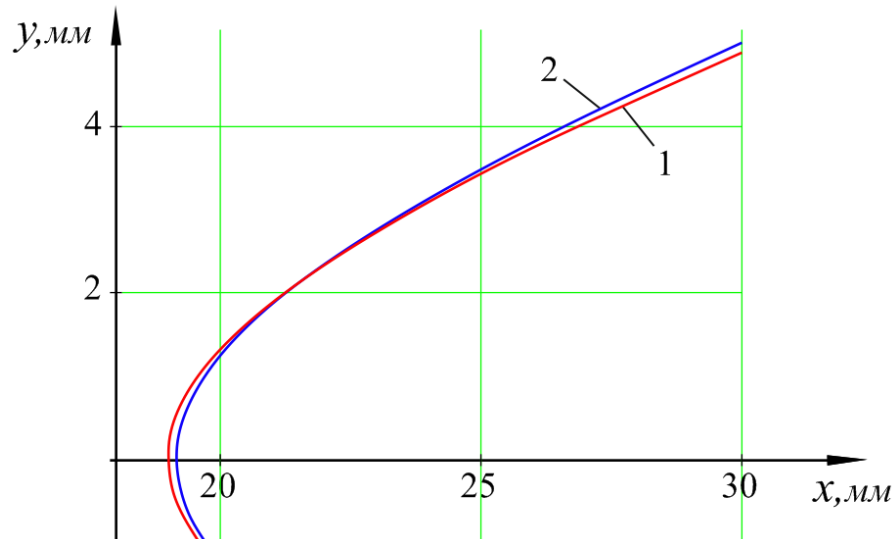


Рисунок 6.11 – Результати розрахунку траєкторії руху електрода: 1 – контур, що обмежує задану деталь з гіперболічною поверхнею, 2 – траєкторія руху дрітяного електрода для одержання заданої форми за ЕЕВО

Розрахунок технологічних параметрів електрохімічної обробки дрітяним електродом поверхні після електроерозійного вирізання ґрунтується на визначенні напруженості електричного поля і часу обробки ділянки поверхні.

Електроерозійне вирізання контуру здійснюється під управлінням ЧПК, і рух за гіперболічною траєкторією відбувається в режимі кругової інтерполяції. Тобто траєкторія з достатньою, наперед заданою точністю може бути апроксимована ділянками дуг. Тому задача зводиться до визначення електричного поля між кругом-катодом і ділянкою анода, обмеженою дугою кола відомого радіуса. Тобто розрахункова схема відповідає умовам математичної моделі пункту 5.4.2 і може бути застосована без змін.

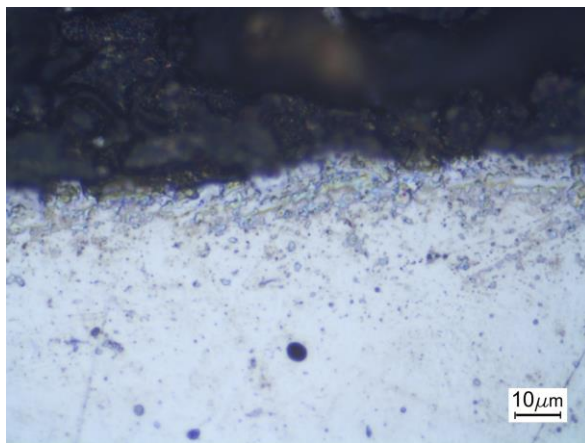
Для виконання наступних завдань по розробці технологічного процесу в повному обсязі використовується інструментарій M11-M16 схеми рисунка 6.1.

З дослідницькою метою проводилась реєстрація стану поверхні на основних стадіях процесу виготовлення деталей. У таблиці 6.1 наведено значення основних параметрів мікрогеометрії поверхні після ЕЕВО та ЕХРО.

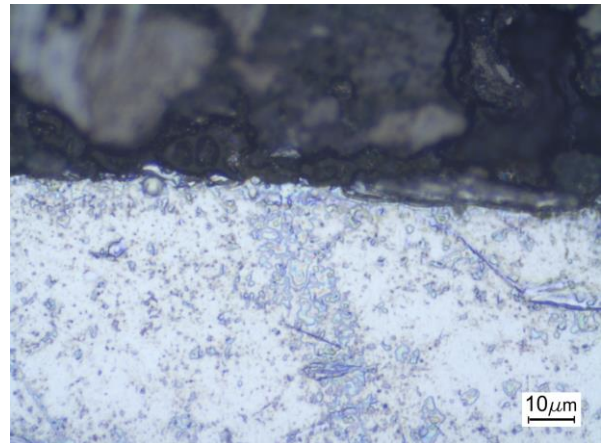
Таблиця 6.1 – Зміна параметрів мікрогеометрії поверхні в процесі обробки

Стадії процесу	шорсткість, Ra , мкм	асиметричність, Rsk	щільність піків, Rpc , pks/cm
прохід ЕЕВО	2,72	0,17	195,8
прохід ЕХРО	0,64	-1,26	41,7

На поверхні ARMCO заліза після ЕЕВО відсутній переплавлений білий шар, характерний для інших вуглецевмісних сплавів заліза. Однак зона термічного впливу товщиною 10-15 мкм помітна на мікрошліфах поперечного перерізу поверхні (рисунок 6.12, а).



а)



б)

Рисунок 6.12 – Мікрошліфи поверхні ARMCO заліза: а) після ЕЕВО, б) з наступною ЕХРО дротяним електродом

В результаті подальшої технологічної операції ЕХРО дротяним електродом зона термічного впливу знімається анодним розчиненням матеріалу (рисунок 6.12, б).

Вимірювання форми поверхні, проведені за допомогою координатно-виміральної машини, показали, що відхилення гіперболічного профілю від заданого по всій поверхні полюса не перевищує 7 мкм.

Проведений натурний експеримент з повним виробом в зборі підтвердив необхідну високу рівномірність магнітного поля для фокусування потоку заряджених частинок.

6.3 Практичне застосування та впровадження результатів досліджень

На теперішній час сформувався стійкий науково-дослідний колектив зі співробітників Черкаського державного технологічного університету (ЧДТУ), який працює за цією тематикою.

Практичні результати роботи колективу складаються з понад 60 впроваджень розробок у виробництво та виконаних робіт. Найбільш значущими з них є наступні:

1995 рік, державне виробниче об'єднання «Форт», м. Вінниця – сприяння у виборі, придбанні електроерозійного верстата, модернізація обладнання, проектування технологічних процесів виготовлення штампів і оснащення для виробництва українського пістолета марки «Форт», що надходить на озброєння міліції України;

2008, 2011, 2017 роки, лабораторія електрофізичних методів обробки, ЧДТУ – проектування технологічного процесу електроерозійної обробки та виготовлення елементів магнітної оптики іонного мікроскопа (розробка Інституту ядерних досліджень, м. Суми, гіперболічна лінійчата поверхня, точність виготовлення < 5 мкм, матеріал – ARMCO залізо), експлуатується в м. Сідней, Австралія;

2007 – 2016 роки, лабораторія електрофізичних методів обробки, ЧДТУ – проектування технологічного процесу і виробництво на електроерозійному обладнанні невеликих партій дрібномодульних зубчастих коліс планетарних редукторів для діючих моделей літальних апаратів авіамоделного спорту

(розробка Вербицького Е. Т.). Виготовлені унікальні зубчасті колеса використовує в своїх моделях багаторазовий чемпіон світу та Європи, багаторазовий володар кубка світу в класі моделей F1C Вербицький Євген (Україна) і ще більше 30 спортсменів вищого міжнародного класу, в тому числі з Німеччини і США;

2011 рік, приватне підприємство «Сервіс - Т», м. Харків – сприяння в придбанні, модернізації і налагодження електроерозійного обладнання, проектування технологічних процесів виготовлення штампів і оснащення для серійного виробництва гальмівних колодок автомобілів;

2003 – 2019 роки, ЗАТ «Мотор-Січ», ДП «Прогрес», м. Запоріжжя – модернізація електроерозійного обладнання, розробка, виготовлення, налагодження і впровадження восьми різних електроерозійних установок, у тому числі однієї, укомплектованої блоком для розмірної електрохімічної обробки, впровадження технологічного процесу гібридної обробки заглушок моноколес турбін газотурбінних авіаційних двигунів.

У додатках наведено Акти впровадження, які документально підтверджують реалізацію результатів роботи в різних виробничих процесах підприємств: ТОВ «Черкасиелеватормаш», ДП НВК «Фотоприлад», м. Черкаси, ЗАТ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Прогрес», м. Запоріжжя.

Висновки за розділом 6

1. За результатами структуризації та систематизації матеріалів проведеного комплексу експериментальних і теоретичних досліджень розроблено САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дрітним електродом, яка дає можливість проектувати ефективні технологічні процеси і відповідно отримувати деталі з заданими та контрольованими параметрами геометричної точності, мікрогеометрії поверхні та структури верхневих шарів.

2. Розроблена САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дротяним електродом пройшла успішну апробацію при проектуванні технологічних процесів виготовлення полюсів квадрупольних лінз для іонних мікроскопів.

3. Результати досліджень впроваджено у виробничих процесах підприємств ТОВ «Черкасиелеватормаш», ДП НВК «Фотоприлад», м. Черкаси, ЗАТ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Прогрес», м. Запоріжжя, що підтверджено відповідними актами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сукупність представлених у дисертації результатів експериментальних та теоретичних досліджень процесів комбінованої дротяної електроерозійної та електрохімічної обробки, отриманих нових наукових положень і технічних рішень становить нове вирішення важливої науково-технічної проблеми створення науково-технологічних засад розвитку перспективної комбінованої технології обробки матеріалів дротяним електродом і робить вагомий внесок у розвиток електрофізичних та електрохімічних методів обробки. Найбільш істотні наукові результати і висновки дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Вперше створено комплекс математичних моделей з використанням аналітичних, CFD та CAE методів для досліджень і розрахунків параметрів базових процесів електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом. На цій підставі отримали розвиток теоретичні основи процесів взаємодії іскрового розряду з залізовуглецевими сплавами в рамках теплової теорії руйнації матеріалу, розвинуті уявлення про прианодні процеси молекулярної дифузії за електрохімічного розчинення в активуючих та пасивуючих електролітах.

2. Створені наукові засади для визначення технологічних режимів, які дозволяють одержати ефективні характеристики процесів комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом, шляхом отримання можливості керованого формування поверхонь з новими заданими геометричними і фізико-хімічними параметрами на підставі створення експериментально-розрахункової системи багатофакторного врахування параметрів обладнання і технологій.

3. Вперше запропоновано експериментально-розрахункову методологію, що ґрунтується на адаптивному узгодженні результатів точних експериментальних досліджень з даними обчислювального експерименту з варійованими вхідними параметрами та є ефективним інструментом наукових досліджень теплових процесів руйнації матеріалу електрода і дає змогу достатньо

адекватно оцінювати параметри джерела тепла, сформованого одиничним іскровим розрядом.

4. Внаслідок проведених серій обчислювальних експериментів з використанням тривимірної моделі теплових процесів руйнації матеріалу електродів на основі чисельного розв'язку трифазної задачі теплопровідності встановлено, що для обраного діапазону параметрів одиничного іскрового розряду сучасних генераторів струму електроерозійних вирізних верстатів найбільший вплив на об'єми як випаруваної, так і рідкої фази матеріалу анода (Сталь 45) мають просторово-енергетичні характеристики каналу розряду, а саме площа дії плоского висококонцентрованого джерела тепла та загальна енергія, що виділилася на електроді (E_a). Водночас площа дії плоского джерела тепла є фактично домінуючою.

5. Запропоновано та обґрунтовано методику визначення параметрів шорсткості поверхонь, сформованих послідовністю дії розрядів, характерних для електроерозійного дротяного вирізання. Розрахунки параметрів шорсткості сталевих деталей за отриманими рівняннями та розрахованими геометричними характеристиками одиничної ерозійної лунки (V_l , d_l , h_l) дають задовільний збіг з експериментально отриманими профілограмами.

6. На основі комплексу експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано й обґрунтовано використання в якості критеріїв оцінки локалізації процесу анодного розчинення при реалізації технологій ЕХРО ДЕ величини зони розчинення та ексцесів (E_s) розподілу густини струму й активності розчинення по поверхні анода. Це забезпечує принципову можливість кількісного опису та надає змогу виокремити вплив на локальність процесу розчинення власне конфігурації напруженості електричного поля в електрохімічній комірці з циліндричним електродом, яка, в свою чергу, обумовлена величиною МЕР і діаметром дроту. Відповідно, отримано можливість адекватної оцінки внеску параметрів електроліту та АЧПДЖ у рівень локалізації процесу розчинення.

7. Встановлено, що розроблена математична модель дифузії в прианодних шарах дає можливість розрахувати технологічні параметри, які забезпечать максимальну ефективність ЕХРО по виходу за струмом. Проведені зіставлення результатів експериментів для імпульсів тривалістю 2 – 10 мс з дотриманням теоретичних рекомендацій і з відхиленням від них доводять, що створена методика дає можливість виконати обґрунтований вибір амплітудно-часових параметрів джерела живлення при проектуванні технологічних процесів електрохімічної обробки дротяним електродом. Запропонований підхід з використанням математичного моделювання дає можливість у перспективі перейти до застосування більш складних форм імпульсів технологічного струму, що надасть додаткові важелі в керуванні процесами в МЕП для покращення якості вихідної поверхні внаслідок анодного розчинення дротяним електродом.

8. Спираючись на методи обчислювальної гідродинаміки, розроблено математичну модель руху електроліту в МЕП для технологічної схеми плоский анод – циліндричний катод при коаксіальній подачі струменя електроліту за допомогою сопла. Підтверджено адекватність моделі шляхом зіставлення результатів з відомими аналітичними розв'язками рівнянь Прандтля для пограничного шару при поздовжньому обтіканні тонкої пластинки набігаючим потоком з малими та великими числами Рейнольдса. Обґрунтовано межі застосування моделі для фазового складу потоку, його швидкості та величини МЕП. Запропоновано конструкцію сопла, яке забезпечує необхідні гідродинамічні характеристики подачі струменя робочої рідини в зону обробки при послідовних технологіях ЕЕДВ та ЕХРО ДЕ.

9. За результатами проведеного комплексу обчислювальних експериментів отримано поля швидкостей потоку електроліту в МЕП залежно від гідродинамічних умов подачі та величини МЕП. Виявлено ділянки на аноді з критично малою чи суттєво нерівномірною швидкістю потоку електроліту. Через низьку швидкість оновлення електроліту ці ділянки обмежують максимальне значення підведеної електричної енергії. Враховуючи це та спира-

ючись на результати моделювання, запропоновано практичні рекомендації по вибору умов подачі електроліту, які дають змогу отримати максимально можливі швидкість та рівномірність потоку.

10. Запропоновано вдосконалену методику розрахунку кількісних параметрів процесу анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів, що мають нерівномірні по товщині електрохімічні характеристики, яка дає можливість уточнити чисельні значення коефіцієнтів електрохімічного розчинення поверхневих шарів сталі та може забезпечити суттєве підвищення точності розрахунків параметрів процесів електрохімічної модифікації поверхонь дротяним електродом.

11. На основі комплексу експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано розрахунково-експериментальну методику і отримано рівняння для розрахунку величини розподіленого зовнішнього навантаження, що діє на дріт при різанні певних груп сталей і твердих сплавів. Отримані результати дають змогу на етапі проектування технологічного процесу розрахувати дійсну форму дротяного електрода і, з її урахуванням, будувати технологію обробки і відповідну траєкторію руху приводів верстата.

12. Розроблено і випробувано методику математичного комп'ютерного розрахунку розподілу густини технологічного струму в тривимірній постановці для конфігурації плоский анод – циліндричний катод, яка допомагає прогнозувати точність формоутворення при проектуванні процесу обробки за комбінованою технологією послідовного застосування ЕЕДВ та ЕХРО ДЕ. Використання результатів моделювання дає змогу визначити припуски на товщину заготовки для повного усунення зон підвищеного електрохімічного розчинення на гранях деталі.

13. Структуризовані та систематизовані результати проведеного комплексу експериментальних і теоретичних досліджень є науковими засадами розробленої САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дротяним електродом, яка дає можливість проектувати ефективні технологічні процеси і, відповідно, отримувати деталі з заданими та контро-

льованими параметрами геометричної точності, мікрогеометрії поверхні та структури поверхневих шарів. Розроблена САПР комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки сталей дротяним електродом пройшла успішну апробацію при проектуванні технологічних процесів виготовлення полюсів квадрупольних лінз для іонних мікроскопів. Крім того, результати досліджень впроваджено у виробничих процесах підприємств ТОВ «Черкасиелеватормаш», ДП НВК «Фотоприлад» (м. Черкаси), ЗАТ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Прогрес» (м. Запоріжжя), що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Albinski K., Musiol K., Miernikiewicz A., Labuz S., Malota M. The temperature of a plasma used in electrical discharge machining. *Plasma Sources Science and Technology*. 1996. T. 5, № 4. С. 736–742.
2. Amineh S. K., Tehrani A. F., Mohammadi A. Improving the surface quality in wire electrical discharge machined specimens by removing the recast layer using magnetic abrasive finishing method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. T. 66, № 9–12. С. 1793–1803.
3. Atlas Specialty Metals: Technical Handbook of Stainless Steels, 2008. 43 с.
4. Bähre D., Rebschläger A., Weber O., Steuer P. Reproducible, Fast and Adjustable Surface Roughening of Stainless Steel using Pulse Electrochemical Machining. *Procedia CIRP*. 2013. T. 6. С. 385–390.
5. Bannard J. Effect of flow on the dissolution efficiency of mild steel during ECM. *Journal of Applied Electrochemistry*. 1977. T. 7, № 3, С. 267–270.
6. Beck J. V. Transient temperatures in a semi-infinite cylinder heated by a disk heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981. T. 24, № 10. С. 1631–1640.
7. Beltrami I., Bertholds A., Dauw D. A simplified post process for wire cut EDM. *J Mater Process Technol*. 1996. № 58(4). С. 385–389.
8. Bhattacharya R., V.K. Jain, P.S. Ghoshdastidar, Numerical simulation of thermal erosion in EDM process. *Journal-institution of engineers India part production engineering division*. 1996. T. 77. С.13–19.
9. Bhattacharyya, B., J. Munda, and M. Malapati, Advancement in electrochemical micro-machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004. № 44(15). С. 1577–1589.
10. Bortels L., Deconinck J., Van Den Bossche B. The multi-dimensional upwinding method as a new simulation tool for the analysis of multi-ion electrolytes controlled by diffusion, convection and migration. Part 1. Steady

state analysis of a parallel plane flow channel. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 1996. T. 404. № 1. C. 15–26

11. Brusilovski, Z., Adjustment and readjustment of electrochemical machines and control of the process parameters in machining shaped surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. № 196(1–3). C. 311–320.

12. Chen Z., Huang Y., Zhang Z., Li H., Ming W., Zhang G. An analysis and optimization of the geometrical inaccuracy in WEDM rough corner cutting. *Int J Adv Manuf Technol*. 2014. №74(5–8). C. 917–929.

13. Chen Z., Zhang G., Han F., Zhang Y., Rong Y. Determination of the optimal servo feed speed by thermal model during multi-pulse discharge process of WEDM. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. T. 142. C. 359–369.

14. Chin D. T. Logarithmic throwing power index for measurements of throwing powers. *J. Electrochem. Soc.* 1971. T. 118, №5. C. 818–821.

15. Chin D. T. Mass Transfer and Current-Potential Relation in Pulse Electrolysis. *Journal of the Electrochemical Society*. 1983. T. 130. №. 8. C. 1657–1667.

16. Chin D. T., Sethi R., McBreen J. Zinc Electrode Morphology in Alkaline Solutions I. Study of Alternating Voltage Modulation on a Rotating Disk Electrode. *Journal of The Electrochemical Society*. 1982. T. 129. № 12. C. 2677–2685.

17. Choo R., Toguri J., El-Sherik A., Erb U. Mass transfer and electrocrystallization analyses of nanocrystalline nickel production by pulse plating. *Journal of applied electrochemistry*. 1995. T. 25. № 4. C. 384–403.

18. Collett D., Hewson-Browne R., Windle D. A complex variable approach to electrochemical machining problems. *Journal of Engineering Mathematics*. 1970. T. 4. № 1. C. 29–37.

19. Dabrowski L., Paczkowski T. Computer simulation of two-dimensional electrolyte flow in electrochemical machining. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2005. T. 41, № 1. C. 91–98.

20. Dang N. M. Simultaneous Micro-EDM and Micro-ECM in Low-resistivity Deionized Water: Work for PhD. Singapore, 2013. 166 c.
21. Datta M., Landolt D. Electrochemical machining under pulsed current conditions. *Electrochimica acta*. 1981. T. 26, № 7. – C. 899–907.
22. Datta M., Landolt D. On the role of mass transport in high rate dissolution of iron and nickel in ECM electrolytes. I. Chloride solutions. *Electrochimica Acta*. 1980. T. 25, № 10. C. 1255–1262.
23. Datta M., Landolt D. On the role of mass transport in high rate dissolution of iron and nickel in ECM electrolytes. II. Chlorate and nitrate solutions. *Electrochimica Acta*. 1980. T. 25, № 10. C. 1263–1271.
24. Datta M., Mathieu H., Landolt D. AES/XPS study of transpassive films on iron in nitrate solution. *Journal of The Electrochemical Society*. 1984. T. 131, № 11. C. 2484–2489.
25. Dauw D., Beltrami I. High-precision wire-EDM by online wire positioning control. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 1994, №43(1), C. 193–197.
26. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical machining of metals: fundamentals of electrochemical shaping. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2004. T.40(12). C. 1230–1265.
27. De Silva A. K. M., Altena H. S. J., McGeough J. A.. Influence of electrolyte concentration on copying accuracy of precision-ECM. *CIRP Annals*. 2003 T. 52, №1. C. 165–168.
28. Deconinck D., Damme S. V., Deconinck J. A temperature dependent multi-ion model for time accurate numerical simulation of the electrochemical machining process. Part II: Numerical simulation. *Electrochimica Acta*. 2012. T. 69. C. 120–127.
29. Deconinck D., Deconinck J. Multi-Ion and Temperature Dependent Numerical Simulation of Electrochemical Machining. *Procedia CIRP*. 2013. T. 6. C. 476–479.

30. Deconinck D., Hoogsteen W., Deconinck J. A temperature dependent multi-ion model for time accurate numerical simulation of the electrochemical machining process. Part III: Experimental validation. *Electrochimica Acta*. 2013. T. 103. C. 161–173.
31. Deconinck D., Van Damme S., Deconinck J. A temperature dependent multi-ion model for time accurate numerical simulation of the electrochemical machining process. Part I: theoretical basis. *Electrochimica Acta*. 2012. T. 60. C. 321–328.
32. Descoeudres A., Hollenstein C., Wälder G., Demellayer R., Perez R. Time- and spatially-resolved characterization of electrical discharge machining plasma. *Plasma Sources Science and Technology*. 2008. T. 17, № 2. C. 024008.
33. Dhobe M., Chopde I., Gogte C. Investigations on surface characteristics of heat treated tool steel after wire electro-discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes*. 2013. T. 28, № 10. C. 1143–1146.
34. DiBitonto D. D., Eubank P. T., Patel M. R., Barrufet M. A. Theoretical models of the electrical discharge machining process. *Journal of applied physics*. 1989. № 66(9). C. 4095–4103.
35. Dodun O., Gonçalves-Coelho A. M., Slătineanu L., Nagîț G. Using wire electrical discharge machining for improved corner cutting accuracy of thin parts. *Int J Adv Manuf Technol*. 2009, №41(9–10). C. 858–864.
36. Eubank P. T., Patel M. R., Barrufet M. A., Bozkurt B. Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model. *Journal of applied physics*. 1993. T. 73, № 11. C. 7900–7909.
37. Firouzabadi H. A., Parvizian J., Abdullah A. Improving accuracy of curved corners in wire EDM successive cutting. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015, № 76, C. 447–459.
38. Fu X. Q., Kang M., Zheng Q. Research on Flow Field Simulation and Experiment of Numerical Control Electrochemical Machining. *Key Engineering Materials*. 2011. T. 458. C. 63–68.

39. Fujisawa T, Inaba K, Yamamoto M, Kato D. Multiphysics simulation of electrochemical machining process for three-dimensional compressor blade. *J Fluids Eng.* 2008. № 130(8). C. 1–7.
40. Galanin S., Kalinnikov I. Polarization of jewelry gold alloys by bipolar current pulses in a polishing electrolyte. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2008. T. 44, № 5. C. 359–366.
41. Ghodsiyeh D., Golshan A., Shirvanehdeh J. A. Review on Current Research Trends in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM). *Indian Journal of Science & Technology.* 2013. T. 6, № 2. C. 154–166.
42. Grimm R. D., Landolt D. Salt films formed during mass transport controlled dissolution of iron–chromium alloys in concentrated chloride media. *Corrosion science.* 1994. T. 36, № 11. C. 1847–1868.
43. Guo Z. N., Lee T. C., Yue T. M., Lau W. S., A study of ultrasonic-aided wire electrical discharge machining. *J. Mater. Process. Technol.* 1997. №.63 (1–3). C. 823–828.
44. Hackert-Oschätzchen M., Penzel M., Kowalick M., Meichsner G., Schubert A. Transient Simulation of the Electrolyte Flow in a Closed Device for Precise Electrochemical Machining. *Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Cambridge.* September, 2014.
45. Hackert-Oschätzchen, M., Kreißig, M., Kowalick, M., Zeidler, H., Schubert, A., Kröning, O., Schulze, H. P. Single discharge simulations of needle pulses for electrothermal ablation. *In Proc. Eur. COMSOL Conf.* 2013 C. 1–3.
46. Haisch T., Mittemeijer E. Electrochemical machining: The role of steel microstructure in high-rate anodic dissolution. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society.* 2002. T. 54, № 7. C. 38–41.
47. Haisch T., Mittemeijer E., Schultze J. On the influence of microstructure and carbide content of steels on the electrochemical dissolution process in aqueous NaCl-electrolytes. *Materials and Corrosion.* 2002. T. 53, № 10. C. 740–755.

48. Han F., Chen W., Ying W., Zhang J. Effects of Polarization on Machining Accuracy in Pulse Electrochemical Machining. *Procedia CIRP*. 2018. T. 68. C. 493–498.
49. Han F., Jiang J., Yu D. Influence of machining parameters on surface roughness in finish cut of WEDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2007. – T. 34, № 5–6. – C. 538–546.
50. Han F., Kunieda M., Sendai T., Imai Y. High precision simulation of WEDM using parametric programming. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*. 2002. T. 51, № 1. C. 165–168.
51. Han F., Zhang J., Soichiro I. Corner error simulation of rough cutting in wire EDM. *Precis Eng*. 2007. T. 31, № 4, C. 331–336.
52. Hargrove S. K., Ding D. Determining cutting parameters in wire EDM based on workpiece surface temperature distribution. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007. T. 34, № 3–4. C. 295–299.
53. Hassan M. A., Mehat N. S., Sharif S., Daud R., Tomadi S. H. , Reza M. S. Study of the Surface Integrity of AISI 4140 Steel in Wire Electrical Discharge Machining. *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*. 2009. T. II, C. 1–6.
54. Hayakawa S., Yuzawa M., Kunieda M., Nishiwaki N. Time Variation and Mechanism of Determining Power Distribution in Electrodes during EDM Process. *IJEM*. 2001. № 6. C. 19–26.
55. Hinduja S., Kunieda M. Modelling of ECM and EDM processes. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*. 2013. T. 62, № 2. C. 775–797.
56. Ho K., Newman S., Rahimifard S., Allen R. State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004. T. 44, № 12. C. 1247–1259.
57. Hsue A. W. J., Su H. C. Removal analysis of WEDM's tapering process and its application to generation of precise conjugate surface. *J Mater Process Technol*. 2004. T. 149, № 1, C. 117–123.

58. Hsue W., Liao Y., Lu S. Fundamental geometry analysis of wire electrical discharge machining in corner cutting. *Int J Mach Tools Manuf.* 1999. T. 39, № 4, C. 651–667.
59. Huang Q. H. Research on Corner Control Strategy of the WEDM. *Applied Mechanics and Materials.* 2014. T. 536. C. 1452–1455.
60. Ibl N. Some theoretical aspects of pulse electrolysis. *Surface Technology.* 1980. T. 10, № 2. C. 81–104.
61. Ibl N., Puippe J. C., Angerer H. Electrocrystallization in pulse electrolysis. *Surface Technology.* 1978. T. 6, № 4. C. 287–300.
62. Ikai T., Fujita I., Hashiguchi K. Heat input radius for crater formation in the electric discharge machining. *IEEJ Transactions on Industry Applications.* 1992. T. 112, № 10. C. 943–949.
63. Ikai T., Hashiguchi K. On the tool electrode material with low erosion in the electric discharge machining. *IEEJ Transactions on Industry Applications.* 1988. T.108, №3, C. 338–343.
64. Inman M., Taylor E., Hall T. Electropolishing of passive materials in HF-free low viscosity aqueous electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society.* 2013. T. 160, № 9. C. E94–E98.
65. Jeng M. C., Doong J. L., Yang C. W. The effects of carbon content and microstructure on the metal removal rate in electrochemical machining. *Journal of materials processing technology.* 1993. T. 38, № 3. C. 527–538.
66. Jiang Y., Zhao W., Xi X., Gu L., Kang X. Detecting discharge status of small-hole EDM based on wavelet transform. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2012. T. 61, № 1–4. C. 171–183.
67. Joshi S., Pande S. Development of an intelligent process model for EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2009. T. 45, № 3–4. C. 300–317.
68. Joshi S., Pande S. Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process. *Journal of manufacturing processes.* 2010. T. 12, № 1. C. 45–56.

69. Kanlayasiri K., Boonmung S., An investigation on effects of wire-EDM machining parameters on surface roughness of newly developed DC53 die steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. T. 187–188, C. 26–29.
70. Kanlayasiri K., Boonmung, S., Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC53 die steel: Design of experiments and regression model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. T.192–193. C. 459–464.
71. Kansal H., Singh S., Kumar P. Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method. *Mathematical and Computer Modelling*. 2008. T. 47, № 11–12. C. 1217–1237.
72. Kawata A., Okada A., Okamoto Y., Kurihara H. Influence of Nozzle Jet Flushing on Wire Breakage in 1st-Cut Wire EDM from Start Hole. *Key Eng Mater*. 2017, T. 749, C. 130–135.
73. Kim C. S. Thermophysical properties of stainless steels. Argonne National Laboratory. Argonne, IL, USA, 1975. 24 c.
74. Kim S., Kwon S. Experimental determination of geometric parameters for an annular injection type supersonic ejector. *Journal of fluids engineering*. 2006. T. 128, № 6. C. 1164–1171.
75. Klocke F., Garzón M., Dieckmann J., Klink A. Process force analysis on sinking-EDM electrodes for the precision manufacturing. *Prod. Eng*. 2011, T.5, №2, C. 183–190.
76. Klocke F., Harst S., Zeis M., Klink A. Modeling and simulation of the microstructure evolution of 42CrMo4 steel during electrochemical machining. *Procedia CIRP*. 2018. T. 68. C. 505–510.
77. Klocke F., Heidemanns L., Zeis M., Klink A. A Novel Modeling Approach for the Simulation of Precise Electrochemical Machining (PECM) with Pulsed Current and Oscillating Cathode. *Procedia CIRP*. 2018. T. 68. C. 499–504.
78. Klocke F., Schwade M., Klink A., Veselovac D., Kopp A. Influence of Electro Discharge Machining of Biodegradable Magnesium on the Biocompatibility. *Procedia CIRP*. 2013. T. 5. C. 88–93.

79. Klocke F., Welling D., Klink A., Veselovac D., Nöthe T., Perez R. Evaluation of advanced wire-EDM capabilities for the manufacture of fir tree slots in Inconel 718. *Procedia CIRP*. 2014. T. 14, № 1. C. 430–435.
80. Klocke F., Zeis M., Klink A. Interdisciplinary modelling of the electrochemical machining process for engine blades. *CIRP Ann. Manuf. Techn.* 2015. T. 64. C. 217–220.
81. Koenig W., Wertheim R., Zvirin Y., Toren M. Material Removal and Energy Distribution in Electrical Discharge Machining. *Annals of the CIRP*. 1975. T. 24, № 1. C. 95–100.
82. Koistinen, D., Marburger, R. A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels. *Acta Metallurgica*. 1959. № 7, C. 59–60.
83. Kozak J., Gulbinowicz D., Gulbinowicz Z. The Mathematical Modeling and Computer Simulation of Pulse Electrochemical Micromachining. *Engineering Letters*. 2008. T. 16, № 4. C. 556–561.
84. Kozak J., Zybura-Skrabalak M. Some problems of surface roughness in electrochemical machining (ECM). *Procedia CIRP*. 2016. T. 42. C. 101–106.
85. Kumar A., Kumar V., Kumar J. Prediction of surface roughness in wire electric discharge machining (WEDM) process base on response surface methodology. *International Journal of Engineering and Technology*. 2012. T. 2, № 4, C. 708–719.
86. Kumar A., Maheshwari S., Sharma C., Beri N. Research developments in additives mixed electrical discharge machining (AEDM): a state of art review. *Materials and Manufacturing processes*. 2010. T. 25, № 10. C. 1166–1180.
87. Kumar K. Investigation and process optimization for different machining characteristics during die cutting with wire EDM. A Thesis for PhD in Mechanical Engineering. 2013. 204 c.

88. Kumsa D., Scherson D. A. Theoretical aspects of pulsed electrochemical micromachining. *Journal of The Electrochemical Society*. 2013. T. 160, № 8. C. H481–H488.
89. Kung, K.Y., Chiang K.T.. Modeling and analysis of machinability evaluation in the wire electrical discharge machining (WEDM) process of aluminum oxide–based ceramic. *Materials and Manufacturing Processes*. 2008. T.23, № 3. C. 241–250.
90. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K., Schumacher B. Advancing EDM through fundamental insight into the process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2005. T. 54, № 2. C. 64–87.
91. Kuriakose S., Shunmugam M. Characteristics of wire-electro discharge machined Ti6Al4V surface. *Materials Letters*. 2004. T. 58, № 17–18. C. 2231–2237.
92. Kurita T., Endo C., Matsui Y., Masuda H., Terasawa K., Tanaka F., Kobayashi K. Mechanical/electrochemical complex machining method for efficient, accurate, and environmentally benign process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008. T.48, №15, C. 1599–1604.
93. Lauwers B., Kruth J. P., Liu W., Eeraerts W., Schacht B., Bleys P. Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. T. 149, № 1. C. 347–352.
94. Lee S. H., Li X. P. Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide. *Journal of Material Processing Technology*. 2003. T. 139. C. 315– 321.
95. Lee S. J., Lee Y. M., Du M. F. The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. T. 140, № 1–3. C. 280–286.
96. Liu J., Guo Y. Modeling of white layer formation in electric discharge machining (EDM) by incorporating massive random discharge characteristics. *Procedia CIRP*. 2016. T. 42. C. 697–702.

97. Lohrengel M., Klüppel I., Rosenkranz C., Bettermann H., Schultze J. Microscopic investigations of electrochemical machining of Fe in NaNO_3 . *Electrochimica acta*. 2003. T. 48, № 20. C. 3203–3211.
98. Lopez J.G., Verleysen P., Degrieck J., Effect of fatigue damage on static and dynamic tensile behavior of electro-discharge machined Ti-6Al-4V. *Journal of fatigue and fracture and engineering materials and structures*. 2012. T. 35, № 12. C. 1120–1132.
99. Luo Y. F. An energy-distribution strategy in fast-cutting wire EDM. *J. Mater. Process. Technol.* 1995. T. 55, № 3–4. C. 380–390.
100. Luo Y. The dependence of interspace discharge transitivity upon the gap debris in precision electrodischarge machining. *Journal of materials processing technology*. 1997. T. 68, № 2. C. 121–131.
101. Luo Y., Tao J. Metal removal in EDM driven by shifting secondary discharge. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2009. T. 131, № 3. C. 031014.
102. Ma N., Xu W., Wang X., Tao B. Pulse electrochemical finishing: Modeling and experiment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. T. 210, № 6. C. 852–857.
103. Maher I., Sarhan A., Marashi H. 1.9 Effect of Electrical Discharge Energy on White Layer Thickness of WEDM Process. *Comprehensive Materials Finishing*. 2017. T. 1. C. 231–266.
104. Maity K.; Mishra H. ANN modelling and Elitist teaching learning approach for multi-objective optimization of μ -EDM. *J. Intell. Manuf.* 2018, T. 29, C. 1599–1616.
105. Marafona J., Chousal J. A finite element model of EDM based on the Joule effect. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. T. 46, № 6. C. 595–602.
106. Martin E. A. Experimental Investigation of a High-Energy Density, High-Pressure Arc Plasma. *Journal of applied physics*. 1960. T.31, № 2, c. 255–267.

107. Masuzawa T., Kuo C. L., Fujino M. A combined electrical machining process for micronozzle fabrication. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*. 1994. T. 43, № 1. C. 189–192.
108. Masuzawa T., Sakai S. Quick finishing of WEDM products by ECM using a mate-electrode. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 1987. T. 36, № 1. C. 123–126.
109. Mills K. C. Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys. Cambridge, 2002. 244 c.
110. Ming W., Zhang Z., Wang S., Huang H., Zhang Y., Zhang Y., Shen D. Investigating the energy distribution of workpiece and optimizing process parameters during the EDM of Al6061, Inconel718, and SKD11. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. T. 92, C. 4039–4056.
111. Mioković T., Schwarzer J., Schulze V., Vöhringer O., Löhe D. Description of short time phase transformations during the heating of steels based on high-rate experimental data. *Journal de Physique IV (Proceedings)*. 2004. T. 120. C. 591–598.
112. Mithu M.A.H., Fantoni G., Ciampi J. A step towards the in-process monitoring for electrochemical microdrilling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. T.57, № 9–12. C. 969–982.
113. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, 2017. 734 c.
114. Moser S. Mikrostrukturierung von Metallen durch elektrochemischen Abtrag mit gepulstem Strom (PECM). Hochschulort: Heinrich–Heine–Universität Düsseldorf, Mathematische-Naturwissenschaftliche Fakultät. Diss. 2004. 108 c.
115. Motoki M., Hashiguchi K. Energy Distribution at the Gap in Electric Discharge Machining. *Annals of the CIRP*. 1967. T. 14. C. 485–489.
116. Mujumdar S. S., Curreli D., Kapoor S. G., Ruzic D. Modeling of Melt-Pool Formation and Material Removal in Micro-Electrodischarge Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015. T. 137, № 3. C. 031007.

117. Mukherjee R., Chakraborty S., Samanta S. Selection of wire electrical discharge machining process parameters using non-traditional optimization algorithms. *Applied Soft Computing*. 2012. T. 12, № 8, C. 2506–2516.
118. Munninghoff, T. R. Mechanismen der anodischen Auflösung von Metallen und Legierungen bei extrem hohen Stromdichten. Doctoral dissertation. Düsseldorf, 2012. 204 c
119. Nelissen G., Van Den Bossche B., Deconinck J., Van Theemsche A., Dan C. Laminar and turbulent mass transfer simulations in a parallel plate reactor. *Journal of applied electrochemistry*. 2003. T. 33, № 10. C. 863–873.
120. Newton T. R., Melkote S. N., Watkin, T. R., Trejo R. M., Reister L. Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718. *Materials Science and Engineering*. 2009. T. 513–514. C. 208–215.
121. Noordin M. Y., Venkatesh V. C., Sharif S., Elting S., Abdullah A. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. T.145. C. 46–58.
122. Okada A., Konishi T., Okamoto Y., Kurihara H. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*. 2015, T. 64, № 1. C. 233–236.
123. Okada A., Uno Y., Nakazawa M., Yamauchi T. Evaluations of spark distribution and wire vibration in wire EDM by high-speed observation. *CIRP annals*. 2010. T. 59, № 1. C. 231–234.
124. Osipenko V. I., Plakhotny A. P., Denisenko A. Yu. Improved methodology for calculating the processes of surface anodic dissolution of spark eroded recast layer at electrochemical machining with wire electrode. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2014. Вип. 1(43). С. 55–60.
125. Osipenko V. I., Stupak D. O., Trigub O. A., Bilan A. V. Calculation of the parameters of the technological current density distribution during wire elec-

trode electrochemical processing. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2012. T.48, №2, C. 105–110.

126. Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. Features of the single crater geometry formation in wire electrical discharge machining using modern current generators. Матеріали IX Міжнародної науково–практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 15–16 травня 2019, Чернігів. С.47–48.

127. Panda D. K., Bhoi R. K. Analysis of spark eroded crater formed under growing plasma channel in electro-discharge machining. *Machining science and technology*. 2005. T. 9, № 2. C. 239–261.

128. Pandey P., Jilani S. Plasma channel growth and the resolidified layer in EDM. *Precision Engineering*. 1986. T. 8, № 2. C. 104–110.

129. Pang G., Xin K., Bu F., Gao T. Modeling and experiment study on inter-electrode gap in electrochemical machining with a floating cathode for rotary parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. T. 101. C. 2151–2164.

130. Panitz T., Wasan D. Flow attachment to solid surfaces: the Coanda effect // *AIChEJournal*. 1972. V. 18. N. 1. P. 51–57.

131. Patel D., Vaghmare V. Review of recent work in wire electrical discharge machining (WEDM). *IJERA*. 2013. T. 3, № 3. C. 805–816.

132. Pérez R., Carron J., Rappaz M., Wälder G., Revaz B., Flükiger R. Measurement and metallurgical modelling of the thermal impact of EDM discharges on steel. Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining, ISEM XV, 2007. C. 17–22.

133. Plaza S., Ortega N., Sanchez J., Pombo I., Mendikute A. Original models for the prediction of angular error in wire-EDM taper-cutting. *Int J Adv Manuf Technol*. 2009, T. 44, № 5–6, C. 529–538.

134. Puippe J. C., Ibl N. Influence of charge and discharge of electric double layer in pulse plating. *Journal of Applied Electrochemistry*. 1980. T. 10, № 6. C. 775–784.

135. Puri A., Bhattacharyya B. An analysis and optimization of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM. *Int J Mach Tools Manuf.* 2003. T. 43, №2. C. 151–159.
136. Puri A.B., Bhattacharyya B. Modeling and analysis of white layer depth in a wire-cut EDM process through response surface methodology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2005. T. 25. C. 301–307.
137. Purushothaman B., Morrison P., Landau U. Reducing mass-transport limitations by application of special pulsed current modes. *Journal of The Electrochemical Society.* 2005. T. 152, № 4. C. J33–J39.
138. Qiu Z. H., Power H. Prediction of electrode shape change involving convection, diffusion and migration by the boundary element method. *Journal of applied electrochemistry.* 2000. T. 30, № 5. C. 575–584.
139. Qu N.S., Fang X.L., Zhang Y.D., Zhu D. Enhancement of surface roughness in electrochemical machining of Ti6Al4V by pulsating electrolyte. *Int J Adv Manuf Technol.* 2013. T. 69, № 9–12. C. 2703–2709.
140. Qu N.S., Hu Y., Zhu D., Xu Z.Y. Electrochemical machining of blisk channels with progressive pressure electrolyte flow. *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. T.29. C. 572–578.
141. Rajurkar K. P., Zhu D., Wei B. Minimization of Machining Allowance in Electrochemical Machining. *Annals of the CIRP.* 1998. T. 47. C. 165–168.
142. Rajurkar K., Kozak J., Wei B., McGeough J. Study of pulse electrochemical machining characteristics. *CIRP Annals Manufacturing Technology.* 1993. T. 42, № 1. C. 231–234.
143. Rajurkar K., Sundaram M., Malshe A. Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia CIRP.* 2013. T. 6. C. 13–26.
144. Ramasawmy H., Blunt L. 3D surface topography assessment of the effect of different electrolytes during electrochemical polishing of EDM surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 2002. T. 42, C. 567–574.

145. Rebschläger A. Recording, processing and use of material-specific data in pulse electrochemical machining. Work for PhD, Saarbrücken, 2015. 135 c.
146. Revaz B., Witz G., Flukiger R., Carron J., Rappaz M. Modeling of the Discharge-Sample Interaction in the Electron Discharge Machining (EDM) Process. IEEE International Conference on Plasma Science. 2005. C. 277–277.
147. Robinson J. W. Finite-difference simulation of an electrical discharge in water. *Journal of Applied Physics*. 1973. T.44, №1. C. 76–81.
148. Rosenkranz C. Elektrochemische Prozesse an Eisenoberflächen bei extremen anodischen Stromdichten. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2005. 133 c.
149. Sánchez J. A., Plaza S., Ramos J., Izquierdo B., Ortega N., Pombo I. New technologies for increasing the capacities of WEDM machines. Materials Science Forum. T. 713. Trans Tech Publ, 2012. C. 97–102.
150. Sanchez J., Plaza S., Ortega N., Marcos M., Albizuri J. Experimental and numerical study of angular error in wire-EDM taper-cutting. *Int J Mach Tools Manuf.* 2008, T. 48, №12, C. 1420–1428.
151. Sanchez J., Rodil J., Herrero A., de Lacalle L., Lamikiz A. On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting. *J Mater Process Technol.* 2007. T. 182, №1, C. 574–579.
152. Sarkar S, Mitra S., Bhattacharyya B. Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. T. 159. C. 286–294.
153. Sarkar S., Sekh M., Mitra S., Bhattacharyya B. A novel method of determination of wire lag for enhanced profile accuracy in WEDM. *Precis Eng.* 2011. T. 35. №2, C. 339–347.
154. Sarkar S., Sekh M., Mitra S., Bhattacharyya B. Modeling and optimization of wire electrical discharge machining of γ -TiAl in trim cutting operation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008 T. 205. C. 376–387.

155. Sawicki J., Paczkowski T. Effect of the hydrodynamic conditions of electrolyte flow on critical states in electrochemical machining. *EPJ Web of Conferences*. 2015. T. 92. C. 02078.
156. Schulze H. P., Leone M., Kröning O., Schätzing W. Simulation of thermal effects for Electrical Discharge Machining. *Nonconventional Technologies Review*. 2007. T. 1. C. 1–3.
157. Schumacher B. M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. T. 149. № 1–3. C. 376–381.
158. Schuster R., Electrochemical Microstructuring with Short Voltage Pulses. *Chem Phys Chem*, 2007. T.8, №1. C. 34–39.
159. Schuster R., Kirchner V., Allongue P., Ertl G. Electrochemical micromachining. *Science*. 2000. T. 289, № 5476. C. 98–101.
160. Selvakumar G., Sarkar S., Mitra S. Experimental investigation on die corner accuracy for wire electrical discharge machining of Monel 400 alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J of Engineering Manufacture*. 2012. T. 226, №10. C. 1694–1704.
161. Sen R., Choudhuri B., Barma J. D., Chakraborti P. Experimental investigation and optimisation of WEDM process for machining maraging steel using neural network based Jaya algorithm. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. 2018. T. 20, № 4. C. 387–399.
162. Shanmugam S. V., Krishnaraj V., Jagdeesh K., Kumar S. V., Subash S. Numerical Modelling of Electro-Discharge Machining Process Using Moving Mesh Feature. *Procedia Engineering*. 2013. T. 64. C. 747–756.
163. Shitik O. Y., Osipenko V. I., Stupak D. O. Technique for the determination of a wire-electrode tool shift value during the process of the conical four-coordinate electroerosion treatment. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007. T.43, №4. C. 287–290.

164. Skoczypiec S. Discussion of ultrashort voltage pulses electrochemical micromachining: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. T. 87, № 1–4. C. 177–187.
165. Skoczypiec S., Ruszaj A. A sequential electrochemical-electrodischarge process for micropart manufacturing. *Precision Engineering*. 2014. T. 38, № 3. C. 680–690.
166. Spur G., Schönbeck J. Anode erosion in wire-EDM – a theoretical model. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 1993. T. 42, № 1. C. 253–256.
167. Subramanian R. Significance of logarithmic throwing index: a theoretical approach. *Journal of Applied Electrochemistry*. 1976. T. 6, №1. C. 15–22.
168. Sun J., Taylor E., Srinivasan R. MREF-ECM process for hard passive materials surface finishing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. T. 108, № 3. C. 356–368.
169. Sundaram M. M., Rajurkar K. P. Electrical and electrochemical processes. *Intelligent Energy Field Manufacturing*. 2010. C. 173–212.
170. Suzuki Y., Kishi M. Improvement of Surface Roughness in wire EDM. Proceedings of the Ninth International Symposium for Electro-Machining (ISEM-9), Nagoya, Japan, 1989.
171. Takayama Y., Makino Y., Niu Y., Uchida H. The Latest Technology of Wire-cut EDM. *Procedia CIRP*. 2016. T. 42. C. 623–626.
172. Tan P., Yeo S. Modelling of overlapping craters in micro-electrical discharge machining. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. T. 41, № 20. C. 205302.
173. Tang L., Gan W.M. Utilization of flow field simulations for cathode design in electrochemical machining of aerospace engine blisk channels. *Int J Adv Manuf Technol*. 2014. T.72, № 9–12. C. 1759–1766.
174. Tang L., Ren L., Zhu Q. EDM multi-pulse temperature field simulation of SiC/Al functionally graded materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. T. 97, № 5–8. C. 2501–2508.

175. Tang L., Yang F., Zhu Q., Gan W. Electrochemical machining flow field simulation and experimental verification for irregular vortex paths of a closed integer impeller. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. №83. C. 275–283.
176. Tao J., Ni J., Shih A. J. Modeling of the anode crater formation in electrical discharge machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2012. T. 134, № 1. C. 011002.
177. Taylor E. J., Inman M. Electrochemical Surface Finishing. *The Electrochemical Society Interface*. 2014. T. 23, № 3. C. 57–61.
178. Tomura, S., Kunieda, M., Nakamura, K., Ukai, Y. Simulation of Wire EDM under Rough Cutting Conditions (Electrical machining). Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century: LEM21, 2005. C. 767–772.
179. Toshimitsu R., Okada A., Kitada R., Okamoto Y. Improvement in surface characteristics by EDM with chromium powder mixed fluid. *Procedia CIRP*. 2016. T. 42. C. 231–235.
180. Tosun N., Cogun C., Pihtili H. The Effect of Cutting Parameters on Wire Crater Sizes in Wire EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. T. 21, C.857–865.
181. Tu J., Yeoh G. H., Liu C. Computational fluid dynamics: a practical approach. Butterworth-Heinemann, 2012. 440 c.
182. Tzeng Y. F., Lee C. Y. Effects of powder characteristics on electro-discharge machining efficiency. *The International Journal of advanced manufacturing technology*. 2001. T. 17, № 8. C. 586–592.
183. Van Damme S., Nelissen G., Van Den Bossche B., Deconinck J. Numerical model for predicting the efficiency behaviour during pulsed electrochemical machining of steel in NaNO_3 . *Journal of applied electrochemistry*, 2006. T. 36, № 1, C. 1–10.

184. Van Dijck F., Dutre W. Heat conduction model for the calculation of the volume of molten metal in electric discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1974. T. 7, № 6. C. 899.
185. Van Tijum R., Pajak T. The Multiphysics Approach: The Electrochemical Machining Process. COMSOL Conference Hanover, 2008.
186. Venkatesh S., Chin D. T. Effect of Sinusoidal AC on the Kinetics of Cu/Cu²⁺ Reaction in Acidic Sulfate Solution. *Journal of The Electrochemical Society*. 1981. T. 128, № 12. C. 2588–2595.
187. Venkatesh S., Chin D. T. The alternating current electrode processes. *Israel Journal of Chemistry*. 1979. T.18, № 1–2, 56–64.
188. Venkatesh S., Meyyappan M., Chin D. T. Mathematical modeling of alternating current modulation of a copper rotating disk electrode in an acid sulfate solution. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1982. T. 85, №1, C. 216–226.
189. Walther B., Produktanalyse beim Electrochemical Machining (ECM) von Ti-basierten Hartmetallen. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2008. 116 c.
190. Wang X., Zhao D., Yun N. Research on intelligent measurement and control method of interelectrode gap of electrochemical machining (ECM). *China Mechanical Engineering*. 2007. T. 18, № 23. C. 2860–4.
191. Weber O., Rebschlager A., Steuer P., Bahre D. *Proceedings of the European COMSOL conference*, Rotterdam, 2013.
192. White F.M. Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill. 2003. 388 c.
193. Wollenberg G., Schulze H. P., Trautmann H. J., Kappmeyer G Controlled current rise for pulsed electrochemical machining, Proceedings of the 15th ISEM, 2007, p. 335–338.
194. Xia H., Kunieda M., Nishiwaki N. Removal amount difference between anode and cathode in EDM process // IJEM. – 1996. – T. 1. – C. 45–52.
195. Xiaobing F. Modeling and Simulation of Crater Formation and Wire Vibration in Micro WEDM. A thesis for PhD of mechanical engineering, 2013. 133 c.

196. Yadav V., Jain V. K., Dixit P. M. Thermal stresses due to electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. T. 42, № 8. C. 877–888.
197. Yamada H., Koba R., Magara T., Akiyoshi M. Working liquid ejector of wire electric discharge machine. U.S. Patent № 7078645. 2006.
198. Yang G., Wang B., Tawfiq K., Wei H., Zhou S., Chen G. Electropolishing of surfaces: theory and applications. *Surface Engineering*. 2017. T.33, №2. C. 149–166.
199. Yang X., Guo J., Chen X., Kunieda M. Molecular dynamics simulation of the material removal mechanism in micro-EDM. *Precision Engineering*. – 2011. T. 35, № 1. C. 51–57.
200. Yao J., Chen Z., Nie Y., Li Q. Investigation on the electrochemical machining by using metal reinforced double insulating layer cathode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. T. 89, № 5–8. C. 2031–2040.
201. Yin K. M. Duplex diffusion layer model for pulse with reverse plating. *Surface and Coatings Technology*. 1997. T. 88, № 1. C. 162–164.
202. Zahiruddin M., Kunieda M. Comparison of energy and removal efficiencies between micro and macro EDM. *CIRP annals*. 2012. T. 61, № 1. C. 187–190.
203. Zaytsev A., Zhitnikov V., Kosarev T. Formation mechanism and elimination of the workpiece surface macro-defects, aligned along the electrolyte stream at electrochemical machining. *Journal of materials processing technology*. 2004. T. 149, № 1. C. 439–444.
204. Zhao C., Xu L. Limiting current density in electrochemical micromachining. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2018. T. 8, № 4. C. 321–330.
205. Zheng X. H., Wei Z. F., Huang S. Experiment Study of Pulse Electrochemical Finishing of GCr15 Bearing Steel. *Advanced Materials Research*. – 2013. T. 705. C. 203–208.

206. Zhu D., Gu Z., Xue T., Zhu D. Flow field design in electrochemical machining of diffuser. *Procedia Cirp*. 2016. Т. 42. С. 121–124.
207. Zhu D., Zhang J.C., Zhang K.L., Liu J., Chen Z., Qu N.S. Electrochemical machining on blisk cascade passage with dynamic additional electrolyte flow. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015. Т. 80. С. 637–645.
208. Атанасянц А. Г. Анодное поведение металлов: Учебн. пособие для вузов. М.: Металлургия. 1989. 151 с.
209. Багоцкий В. С. Основы электрохимии. М. : Химия, 1988. 400 с.
210. Бельский М. А., Иванов А. Ф., Электроосаждение металлических покрытий: Справ. изд. М.: Металлургия, 1985. 288 с.
211. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 544 с.
212. Волгин В. М., Любимов В. В., Давыдов А. Д. Эффективный метод моделирования процессов ионного переноса при ультракоротких импульсах тока. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2014. Вып. 11. Ч. 2. С. 22–36.
213. Галанин С. И. Электрохимическая обработка металлов и сплавов микросекундными импульсами тока: монография. Кострома: Костром. гос. техн. унив., 2001. 118 с.
214. Генератор для електроерозійної обробки: патент на винахід №7722/1 Україна, 13.06.2005.
215. Давыдов А. Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М.: Наука, 1990. 272 с.
216. Демьянцева Н. Г., Кузьмин С. М., Балмасов А. В. Оценка точности формообразования при электрохимической обработке металлов *Электронная обработка материалов*. 2012. Т.48, №3. С. 46–49.
217. Житников В. П., Зайцев А. Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка: монография. М.: Машиностроение, 2008. 413 с.
218. Золотых Б. Н. Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки. М.: МВИССО РСФСР, 1975. 104 с.

219. Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р. Физические основы электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1977. 41 с.
220. Иоффе В. Ф., Коренблюм М. В., Шавырин В.А. Автоматизированные электроэрозионные станки. Л.: Машиностроение, 1984. 227 с.
221. Калейніков Г. Є., Поляков С. П., Осипенко В. І. Вплив поверхнево-активних речовин на параметри промивання міжелектродного проміжку. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки*. 2002. № 1. С. 50–55.
222. Коваленко В. С. Нетрадиционные методы обработки материалов в Японии. *Электронная обработка материалов*. 2000. № 3. С. 4–12.
223. Коваленко В. С. Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. К.: Вища школа, 1983. 176 с.
224. Коренблюм М. В., Полуянов В. С. Автоматизированные электроэрозионные станки. Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Резание металлов. Станки и инструменты. 2000. № 11. 140 с.
225. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М.:Наука, 1987. 688 с.
226. Лазаренко Б. Р. Физические основы электроискровой обработки металлов. *Вестник АН СССР*. 1959. №6. С. 49–56.
227. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – М.: Дрофа, 2003. 840 с.
228. Ломакин В. О., Чабурко П. С. Влияние геометрической формы сопла струйного насоса на его характеристики. *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 12, С. 210–219.
229. Лямаев Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки. Л.: Машиностроение. 1988. 256 с.
230. Мороз И. И. Электрохимическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1969. – 208 с.
231. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. М.: Мир. 1977. 464с.

232. Осипенко В. И., Плахотный А. П., Билан А. В. Исследование процессов съема материала при электрохимической размерной обработке проволочным электродом. *Вісник СевНТУ*. 2011. – Вип. 118. С. 107–112.
233. Осипенко В. І., Плахотний О. П., Філімонова Н. В. Фізика і технологія електроерозійного дротяного вирізання: монографія. Черкаси: Черкас. держ. технол. ун-т. 2019. 251 с.
234. Осипенко В.І. Аналітична оцінка впливу просторово–енергетичних характеристик іскрового розряду на об’єм ерозійної лунки на сталевому аноді. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2003. №4. С. 28–31.
235. Плошкин В. В. Моделирование тепловых процессов при электроэрозионной обработке стали. *СТИН*. 2003. №2. С. 27 – 32.
236. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник: В 3 т. / Под ред. И.А. Биргера, Р.Г. Пановко. М.:Машиностроение, 1968. Том 1. 831 с.
237. Спосіб електроерозійного вирізання внутрішніх кутів деталей: патент на винахід. 40017 А UA МПК 6 В23Н7/02. / Осипенко В. І., Поляков С. П., Ступак Д. О. – Заявл. 13.02.98; опубл. 16.07.01. Бюл. № 6. – 2 с.
238. Способ электроэрозионной вырезки: *SU 1340950 A1 B23 H7/02, 7/10* / Б. Л. Овсянников. – Оpubл. 30.09.1987, Бюл. № 36.
239. Справочник по электрохимии. / Под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1981. 488 с.
240. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л.Амитан, И.А.Байсупов, Ю.М.Барон и др.; Под общ. Ред. В.А.Волосатова. Л.: Машиностроение, 1988. 719 с.
241. Толстая М. А., Анисимов А. П. Теоретические основы процессов электрохимической обработки металлов и сплавов: Учебн. пособие. Часть 1. Москва. 1975. 101 с.
242. Тригуб О. А., Билан А. В., Осипенко В. І., Ступак Д. О. Дослідження течії робочої рідини в проміжку між електродом–інструментом та за-

готовкою. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2011. Вип. 11. Т.1. С. 51–57.

243. Фотеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980. 184 с.

244. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.

ДОДАТКИ

Додаток А. Акти впровадження наукових результатів у виробництво

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора підприємства-
головний інженер ЗМКБ «Прогрес»


О.В. Подобний

“ 31 ” 05 2019 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-дослідних та науково-технічних робіт

Даний акт складений у тому, що по результатах досліджень виконаних к.т.н., доцентом Плахотним О.П., асистентом Тімченком О.В., д.т.н., професором Осипенком В.І. в Черкаському державному технологічному університеті розроблена комбінована технологія електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом, яка впроваджена на Державному підприємстві ЗМКБ «Прогрес», м. Запоріжжя.

Проведена модернізація основних технологічних систем електроерозійного вирізного верстату СЕЛД – 02М. Електроерозійне обладнання укомплектовано новою системою ЧПК з відповідним програмним забезпеченням та блоком для розмірної електрохімічної обробки. Впроваджена методика проектування і реалізації технологічних процесів за послідовного використання однопровідного електроерозійного різання повного зйому з наступними 1-2 проходами електрохімічного фінішування поверхні дротяним електродом. Запроваджена технологія дала можливість розширити номенклатуру деталей, що виготовляються без подальших додаткових операцій.

Експериментальна перевірка отриманих результатів за умов реального виробництва інструментальної оснастки показала, що використання запропонованої комбінованої технології на вирізному верстаті СЕЛД - 02М дозволяє підвищити точність формоутворення складноконтурних деталей з $\pm 0.05\text{мм}$, до $\pm 0.02\text{мм}$ та знизити шорсткість поверхні деталі до $Ra\ 0.35 - 0.6\ \mu\text{м}$ зі скороченням загального часу обробки.

Представники ЗАТ «Мотор Січ», ДП «Прогрес»:

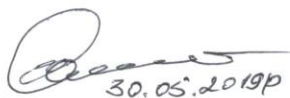
Головний механік



А.В.Четверяков

Представник Черкаського державного
технологічного університету:

Професор д.т.н.,


30.05.2019p

В.І. Осипенко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер державного
підприємства НВК «Фотоприлад»_____
“25” _____ В.В. Власюк

_____ 2016 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт складений у тому, що по результатах досліджень виконаних професором Осипенко В.І., доцентом Плахотними О.П. та аспірантом Тимченко О. В. в лабораторії електрофізичних методів обробки Черкаського державного технологічного університету, на державному науково – виробничому комплексі “Фотопилад” м. Черкаси, проведена модернізація ЕЕВВ СЕЛД – 03М та впроваджено розроблений модуль для електрохімічної модифікації властивостей поверхневих шарів сталевих деталей. Експериментальна перевірка отриманих результатів за умов реального виробництва інструментальної оснастки показала, що використання комбінованої електроерозійної та електрохімічної обробки, дозволяє скоротити кількість проходів для досягнення заданої шорсткості поверхні на 40 – 50% та при необхідності повністю видаляти з оброблених сталевих поверхонь зону термічного впливу, яка формується при електроерозійному вирізанні.

Представник ДП НВК «Фотоприлад»:

Головний технолог

Представник ЧДТУ:

Професор, д.т.н.

Л.І. Каневський

В.І. Осипенко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ “Черкасиелеватормаш”



О.М. Черненко

“ 00952522- ” 2016 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт складений у тому, що по результатах досліджень та розробок, виконаних співробітниками Черкаського державного технологічного університету доктором технічних наук, професором Осипенком В.І. та кандидатом технічних наук, доцентом Плахотним О.П., проведена модернізація основних технологічних систем електроерозійного вирізного комплексу СЕЛД – 03М на інструментальному виробництві компанії ТОВ “Черкасиелеватормаш”.

В результаті впроваджено комбіновану технологію електроерозійної та електрохімічної обробки дрітним електродом, суть якої полягає в застосуванні електрохімічного анодного розчинення поверхневих шарів деталі після електроерозійних чорнових проходів. Це дозволило скоротити кількість технологічних операцій електроерозійного вирізання для досягнення параметрів вихідної поверхні згідно з технічним завданням. Збільшилась номенклатура деталей інструментальної оснастки, яка виготовляється на комплексі СЕЛД – 03М та не потребує подальшої фінішної обробки і готова для практичного використання у виробничому процесі виготовлення продукції ТОВ “Черкасиелеватормаш”.

Досвід експлуатації та експериментальна перевірка отриманих результатів за умов реального виробництва деталей екструдерів, екструзійних ліній, маслопресів торгової марки BRONTO показали, що використання запропонованої технології, дозволяє підвищити точність вирізних операцій на комплексі СЕЛД - 03М з $\pm 0.05\text{мм}$ до $\pm 0.02\text{мм}$ та отримати поверхню з шорсткістю до $Ra\ 0.2-0.5\ \mu\text{м}$ з практично відсутньою зоною термічного впливу.

Представники ТОВ “Черкасиелеватормаш”:

Начальник групи
технологічного супроводу



А.І. Йохна

Начальник інструментальної
дільниці



Г.І. Соломатін

Представники Черкаського державного
технологічного університету:

д.т.н., професор



В.І. Осипенко

к.т.н., доцент



О.П. Плахотний

Додаток Б. Патент на винахід.





МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **117497** (13) **C2**
(51) МПК
B23H 7/36 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(21) Номер заявки: а 2016 03393	(72) Винахідник(и): Осипенко Василь Іванович (UA), Денисенко Артем Юрійович (UA), Плахотний Олександр Петрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 01.04.2016	(73) Власник(и): Осипенко Василь Іванович, вул. 30 років Перемоги, 22/1, кв. 190, м. Черкаси, 18029 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 10.08.2018	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: CN 102699462 A, 03.10.2012 US 20050072759 A1, 07.04.2005 US 5128505 A, 07.07.1992 US 5739497 A, 14.04.1998 UA 55730 A, 15.04.2003 EP 2752268 A1, 09.07.2014 DE 19983974 B4, 04.10.2007 US 6344624 B1, 05.02.2002
(41) Публікація відомостей про заявку: 10.10.2017, Бюл.№ 19	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.08.2018, Бюл.№ 15	

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПОДАЧІ РОБОЧОЇ РІДИНИ В МІЖЕЛЕКТРОДНИЙ ПРОМІЖОК

(57) Реферат:

Винахід належить до технології комбінованої електрофізичної та електрохімічної обробки незмінним дротяним електродом. Пристрій для подачі робочої рідини в зону обробки при послідовній електроерозійній та електрохімічній обробці дротяним електродом з коаксіальною подачею робочої рідини в міжелектродний проміжок містить сопло з кришкою, а також внутрішній формувач потоку та камеру для робочої рідини всередині сопла. При цьому внутрішній формувач потоку має змінну частину з пазом розрахованого перерізу, який гідравлічно з'єднує камеру всередині сопла з поверхнею кришки та каналом подачі електрода до робочої зони. Винахід дозволяє замінити явище інжекції повітря в соплі на інжекцію робочої рідини, а також забезпечити однорідність робочого середовища в міжелектродному проміжку при послідовній електроерозійній та електрохімічній обробці незмінним дротяним електродом. Ці показники є дуже важливими для технологічного процесу та забезпечують підвищення якості та продуктивності обробки.

UA 117497 C2

UA 117497 C2

Винахід належить до електрофізичних і електрохімічних методів обробки, а саме використовується для надання потоку робочої рідини необхідних гідродинамічних властивостей в технології послідовної електроерозійної та електрохімічної обробки дріт'яним електродом. Основні характеристики це швидкість потоку рідини, спрямовування рідини коаксіально з дріт'яним електродом, а також забезпечення однорідності робочого середовища в зоні обробки.

Під час експлуатації може виникати проблема утворення бульбашок повітря всередині потоку рідини. Це пов'язано з явищем інжекції, тобто затягуванням повітря в сопло, що порушує коаксіальність струменя відносно дріт'яного електрода на виході з сопла та призводить до появи неоднорідності робочого середовища в зоні обробки. Для роботи технологічної системи це неприпустимо.

Відомі рішення, що підвищують ефективність подачі робочої рідини в зону обробки, зокрема патент US 7078645B2. Авторами даного патенту запропонована конструкція сопла для електроерозійної обробки з використанням каналів різних діаметрів внутрішньої частини сопла. Така конструкція сопла дозволяє покращити коаксіальний потік електроліту вздовж дроту-електрода. Недоліком даного рішення є неможливість використання за умов послідовної електроерозійної та електрохімічної обробки незмінним дріт'яним електродом через обмеження максимального діаметра струменя.

Прототипом винаходу є патент CN 102699462 В, який виконує подібну функцію, має схожу конструкцію і відрізняється внутрішньою структурою від запропонованої нами конструкції для забезпечення необхідних характеристик струменя рідини. Недоліком даного рішення є надвисока складність конструкції, що обмежує економічну доцільність її застосування в технологічному обладнанні відносно низького цінового діапазону.

Задачею винаходу є створення удосконаленого пристрою подачі рідини в зону обробки, який забезпечує заміну фізичного явища інжекції повітря на інжекцію робочої рідини, її необхідні витрати і однорідність робочого середовища в міжелектродному проміжку за умов послідовної електроерозійної та електрохімічної обробки незмінним дріт'яним електродом.

Поставлена задача вирішується за рахунок наявності паза, розрахованого поперечного перерізу у змінній частині внутрішнього формувача потоку рідини, в місці стикування змінної частини і кришки. Поверхня стикування являє собою циліндр, на бічній поверхні якого і вирізається паз розрахованого геометричного перерізу. Він служить для вирівнювання тиску рідини в соплі і забезпечує наявність контрольованого об'єму рідини над верхньою кришкою сопла, таким чином замінюючи інжекцію повітря на інжекцію робочої рідини в сопло з відсутністю надмірного розтікання рідини по кришці сопла. Величина паза вибирається в залежності від тиску та швидкості руху рідини, що подається в сопло.

На фіг. 1 представлена схема запропонованого пристрою для коаксіальної подачі рідини.

Фіг. 1. Схема пристрою сопла: 1 - впускний отвір; 2 - камера всередині сопла; 3 - кришка сопла; 4 - додатковий канал (паз); 5 - дріт-електрод інструмент (ДЕІ); 6 - канал подачі ДЕІ; 7 - змінна вставка з пазом; 8 - внутрішній формувач потоку; 9 - розподільні канали внутрішнього формувача потоку; 10 - зовнішня частина сопла; 11 - канал виходу із сопла.

Сопло (фіг. 1) для послідовної електроерозійної та електрохімічної дріт'яної обробки розміщується у верхній камері електроерозійного верстата. Воно складається з внутрішнього формувача потоку 8 та зовнішньої частини сопла 10. Внутрішній формувач потоку комплектується змінною вставкою 7 з додатковим пазом 4. Формувач і вставка з'єднані між собою за допомогою різьби. Це дає змогу використовувати одне сопло для різних тисків з заміною лише вставки 7. В центрі формувача потоку 8 знаходиться канал 6 вздовж якого подається дріт-електрод 5.

Робоча рідина через впускний отвір 1 подається до камери 2, звідки основна її маса через канали 9 проходить у зовнішню частину сопла 10 і надалі через вивідні канали 11 під тиском виводиться назовні коаксіально дроту-електроду 5. Інша частина робочої рідини під дією тиску виходить через додатковий паз 4, розрахованого перерізу на поверхню кришки 3 і через канал 6 потрапляє в робочу зону, тим самим замінюючи фізичне явище інжекції повітря на інжекцію робочої рідини та уникаючи надмірного розтікання рідини по поверхні кришки 3.

В основі рішення поставленої задачі покладено чисельно експериментальний розрахунок в MCAE (MechanicalComputerAidedEngineering).

Фізичні властивості рідини (в'язкість, густина і т.п.), що використовуються при розрахунку, задавалися рівним значенням фізичних властивостей звичайної води при температурі 293,2 К та тиском 101325 Па. Як граничні умови при проведенні чисельного експерименту було задано тиск на вході і на виході.

Для кожного конкретного випадку в результаті чисельного експерименту було отримано величини площі поперечного перерізу паза 4, при якому за заданих тиску і швидкості потоку

UA 117497 C2

робочої рідини на виході із сопла інжекційні витрати в каналі ДЕІ 6 рівні витратам через додатковий паз 4, що забезпечує без надмірного розтікання робочої рідини по поверхні кришки 3, заміну інжекції повітря на інжекцію робочої рідини в канал ДЕІ 6. Результати розрахунків для конкретних технологічних випадків представлені в таблиці 1. Розрахунковий приклад розподілу

5 поля швидкостей робочої рідини на виході з сопла представлений на Фіг. 2. Достовірність розрахунків перевірена і підтверджена експериментально.

Таким чином, отримані розрахункові дані, що співпадають з експериментальними результатами показують, що заявлений пристрій забезпечує однорідність робочого середовища в міжелектродному проміжку, заміну явища інжекції повітря на інжекцію робочої рідини без

10 шкідливого надмірного розтікання робочої рідини по поверхні кришки 3.

Таблиця 1

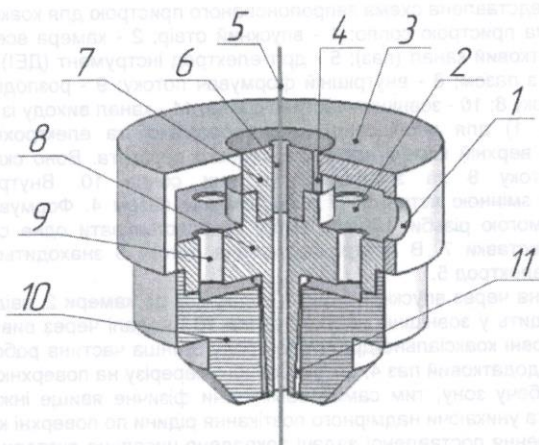
Отримані чисельні результати

Характеристики	Числові значення				
Тиск, атм	0,4	0,6	0,8	1	2
Середня швидкість потоку рідини на виході з сопла $V_{\text{вих.}}$, м/с	2,5	3,1	3,5	4,1	5,4
Витрати через додатковий паз $Q_{\text{паз}}$, л/хв	0,03	0,041	0,1	0,22	0,33
Інжекційні витрати в каналі для ДЕІ $Q_{\text{ДЕІ}}$, л/хв	0,031	0,042	0,09	0,2	0,32
Площа поперечного перерізу додаткового каналу, мм ²	0,193	0,201	0,32	0,505	0,52

ФОРМУЛА ВІНАХОДУ

15 Пристрій для подачі робочої рідини в зону обробки при послідовній електроерозійній та електрохімічній обробці дріт'яним електродом з коаксіальною подачею робочої рідини в міжелектродний проміжок, причому пристрій містить сопло з кришкою, а також внутрішній формувач потоку та камеру для робочої рідини всередині сопла, який відрізняється тим, що

20 внутрішній формувач потоку має змінну частину з пазом розрахованого перерізу, який гідравлічно з'єднує камеру всередині сопла з поверхнею кришки та каналом подачі електрода до робочої зони.



Фіг. 1

Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації.

1. Осипенко В. І. Фізика і технологія електроерозійного дротяного вирізання: монографія / В. І. Осипенко, О. П. Плахотний, Н. В. Філімонова ; Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси, 2019. – 251 с.

Здобувачем запропоновано ряд математичних моделей теплової руйнації матеріалу за дії іскрових розрядів, формоутворення поверхні гнучким дротяним електродом, що становлять наукові засади ЕЕДВ.

2. Plakhotnyi O. Forming and finishing surface by sequential electrochemical-electrodischarge machining of precision magnetic optics parts / O. Plakhotnyi, V. Osypenko // Int. J. Machining and Machinability of Materials. – 2020. – Vol. 22. – No. 3/4. – P. 331–347. DOI: [10.1504/IJMMM.2020.107061](https://doi.org/10.1504/IJMMM.2020.107061). *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в Scopus.*

Здобувачем запропоновано й експериментально перевірено методiku розрахунку параметрів електрохімічної обробки дротяним електродом гіперболічної лінійчатої поверхні після електроерозійного вирізання.

3. Osypenko V. I. Determination of power factors affecting surface formation in the process of electrical discharge machining / V. I. Osypenko, O. P. Plakhotnyi // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2019. – Vol. 55. – No. 6. – P. 621–629. DOI: [10.3103/S1068375519060073](https://doi.org/10.3103/S1068375519060073). *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в Scopus.*

Здобувачеві належать теоретичні розрахунки кількісних значень силових чинників, що діють на дротяний електрод за ЕЕДВ, які лягли в основу експериментальної частини роботи.

4. Osypenko V. Principles of the express method for controlling interelectrode space condition during wire electrochemical processing / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. // Journal of Electrochemical Science and Engineering. – 2019. – № 9 (4). – P. 269–280. DOI: [10.5599/jese.660](https://doi.org/10.5599/jese.660). *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в WoS-(ESCI).*

Здобувачем запропоновано метод та показано його практичну можливість оперативного контролю стану міжелектродного проміжку за ЕХРО дротяним електродом.

5. Plakhotnyi O. Computer modeling of forming surface by sequential wire electrodischarge-electrochemical machining / Plakhotnyi O., Timchenko O., Osypenko V. // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2353 – P. 744–754. Online: <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper59.pdf>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в Scopus.*

Здобувачем розроблено математичні засади комп'ютерного моделювання процесу формоутворення поверхонь за комбінованою послідовною технологією електроерозійного вирізання та електрохімічної обробки дротяним електродом.

6. Osypenko V. Surface forming features of new combined wire electrical discharge-electrochemical machining technology / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. // Nonconventional Technologies Review. – 2019. – № 23 (2). – P. 52–57. Online: <http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/223>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в ProQuest, EBSCOhost, DOAJ, Google Scholar, Index Copernicus.*

Здобувачем виявлено закономірності впливу режимів ЕЕДВ та ЕХРО незмінним дротяним електродом на структуру поверхневих шарів та мікрогеометрію поверхонь в обраній групі матеріалів.

7. Determination of microhardness and depth of thermally hardening zone in quality carbon structural steel after WEDM using different discharge parameters / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O., Kondakov A. // Nonconventional Technologies Review. – 2020. – № 24 (3). – P. 31–39. Online: <http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/294>. *Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в ProQuest, EBSCOhost, DOAJ, Google Scholar, Index Copernicus.*

На основі представлених результатів експериментальних досліджень здобувачем встановлено, що домінуючий вплив на формування товщини термічно зміцненого шару має тривалість імпульсу струму.

8. Осипенко В. И. Определение силовых факторов, влияющих на формообразование поверхности при электроэрозионной вырезной обработке / В. И. Осипенко, А. П. Плахотный // Электронная обработка материалов. – 2018. –

№ 6. – С. 9–18. Online: <http://eom.phys.asm.md/ru/journal/shortview/1674>.
Стаття у фаховому іноземному виданні, що індексується в EBSCO, DOAJ.

Здобувачем проведено обчислювальні експерименти на основі запропонованої розрахунково-експериментальної методики для визначення зовнішнього навантаження, що діє на дріт за електроерозійного різання певних груп сталей та твердих сплавів.

9. Осипенко В. І. Поляризація імпульсним струмом анода з вуглецевої сталі при використанні латунного катода в водному розчині NaCl / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Тімченко О. В. // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. праць (Технічні науки). – 2018. – Вип. 37. – С. 97–105. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в DOAJ, Google Scholar, Index Copernicus, OCLC WorldCAT, BASE, SIS, ResearchBib, I2OR, CiteFactor, ESJI, DIIF, PBN.*

Здобувачем виявлено закономірності та встановлено рівні вагомості впливу технологічних чинників на динаміку поляризації анода з вуглецевої сталі за використання латунних електродів у водному розчині солі NaCl.

10. Плахотний О. П. Моделювання впливу амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів на процеси анодного розчинення при електрохімічній обробці дротяним електродом / О. П. Плахотний // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2018. – № 3. – С. 87–96. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

11. Плахотний О. П. Підвищення точності розмірної електрохімічної обробки дротяним електродом на основі моделювання тривимірних електростатичних полів / О. П. Плахотний // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2018. – № 1. – С. 60–66. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

12. Осипенко В. І. Оцінка адекватності критеріїв локалізації процесу анодного розчинення при використанні циліндричних дротяних електродів / Оси-

пенко В. І., Плахотний О. П., Тімченко О. В. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2016. – № 2. – С. 84–91. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

Здобувачем запропоновано статистичний ймовірнісний підхід для наукового обґрунтування нового критерію визначення рівня локалізації процесу електрохімічного розчинення середньовуглецевих сталей за використання схеми обробки з циліндричними дротяними електродами та коаксіальною подачею електроліту.

13. Osypenko V. Modeling of nozzle in jet pump mode for electrical discharge and electrochemical machining / Osypenko V., Plakhotnyi O., Denysenko A. // Technological Complexes. – 2016. – № 1 (13). – Р. 40–46. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus, CiteFactor, Google Scholar, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, SIS, ERIH PLUS.*

Здобувачем проведено чисельне моделювання роботи сопла в режимі струменевого насоса в процесі ЕЕДВ та ЕХРО для забезпечення необхідної швидкості потоку рідини коаксіально з дротяним електродом, стабільності та однорідності робочого середовища в зоні обробки.

14. Осипенко В. І. Розрахунок мікрогеометричних параметрів поверхневого шару при електроерозійному дротяному вирізанні повного зйому / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Нестеренко І. М. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2015. – № 3. – С. 95–102. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus Journals Master List, BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref, DOAJ, ESJI, ResearchBib, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.*

Здобувачем отримано основні співвідношення для визначення взаємозв'язку параметрів шорсткості поверхні з геометричними параметрами одиної ерозійної лунки.

15. Osipenko V. I. Improved methodology for calculating the processes of surface anodic dissolution of spark eroded recast layer at electrochemical machining with wire electrode / Osipenko V. I., Plakhotny A. P., Denisenko A. Yu. // Праці Оде-

ського політехнічного університету. – 2014. – Вип. 1 (43). – С. 55–60. *Стаття у фаховому виданні України, що індексується в Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, «Україніка наукова».*

Здобувачем отримано аналітичний розв'язок крайової задачі анодного розчинення поверхневих електроерозійно модифікованих шарів, що мають нерівномірні по товщині електрохімічні характеристики.

16. Осипенко В. И. Исследование процессов съема материала при электрохимической размерной обработке проволочным электродом / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Билан А. В. // Вісник СевНТУ : зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 118. – С. 107–112. – Серія : Машиноприладобудування та транспорт. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем отримано аналітичний розв'язок задачі про розподіл густини струму на поверхні деталі для технологічної схеми ЕХРО ДЕ.

17. Моделювання та керування впливом поперечної жорсткості дротяного електрода на точність електроерозійного утворення конічних поверхонь / Поляков С. П., Осипенко В. І., Плахотний О. П., Ступак Д. О., Шитик О. Ю. // Вібрації в техніці та технологіях. – 2007. – № 3 (48). – С. 42–45. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем розвинуто математичну модель форми дротяного електрода з урахуванням поперечної жорсткості за чотирикоординатного електроерозійного різання.

18. Моделювання теплових процесів руйнації електродів розрядами, характерними для електроерозійного вирізання / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Полонський Л. Г., Степчин А. Я. // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2006. – № 4. – С. 63–70. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем обґрунтовано постановку нелінійної крайової задачі теплопровідності з рухомими границями фаз для умов ЕЕДВ, підібрано ефективний чисельний метод її розв'язку.

19. Модель для розрахунку викривлень дрогового електрода при чотирикоординатній електроерозійній обробці / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Роман В. В., Ступак Д. О. // Наукові вісті Національного технічного універси-

тету України «Київський політехнічний інститут». – 2003. – № 5. – С. 77–81. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем отримано аналітичний розв'язок задачі про форму дрітязного електрода при поперечному навантаженні, характерному за чотирикоординатного електроерозійного вирізання.

20. Осипенко В. И. Новые технические решения в управлении характеристиками импульсов при электроэрозионной вырезной обработке проволочным электродом / В. И. Осипенко, А. П. Плахотный // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 275–277. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем проведено дослідження процесів формування ерозійної лунки залежно від енергії імпульсів та діаметра каналу іскрового розряду з метою розробки принципово нового генератора коротких імпульсів для ЕЕДВ.

21. Підвищення точності чотирикоординатної електроерозійної обробки складноконтурних деталей / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Ступак Д. О., Цвітохін М. С. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – № 1. – С. 56–60. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем виділено технологічні параметри ЕЕДВ, які суттєво впливають на точність формоутворення при виготовленні складноконтурних деталей.

22. Термоупругая модель внутриэлектродных процессов электроэрозионной технологии / Поляков С. П., Осипенко В. И., Плахотный А. П., Тригуб О. А. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. трудов. – Донецк : ДонГТУ, 2001. – Вып. 17. – С. 168–171. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем обґрунтовано вибір граничних умов, що відображають характерну локальність теплового навантаження на дрітязний електрод в термopужній математичній моделі.

23. Плахотний О. П. Формування твердосплавних різальних елементів фасонного інструменту за допомогою електроерозійної обробки / О. П. Плахотний, С. П. Поляков // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 1998. – № 1. – С. 62–66. *Стаття у фаховому виданні України.*

Здобувачем отримано математичні формули, що лежать в основі розробленої методики проектування процесу формоутворення складнопрофільних деталей різального інструменту за ЕЕДВ.

24. Пристрій для подачі робочої рідини в міжелектродний проміжок : пат. на винахід № 117497 Україна : МПК В23Н 7/36 / В. І. Осипенко, А. Ю. Денисенко, О. П. Плахотний. – № а201603393 ; заявл. 01.04.2016 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15. *Участь у створенні винаходу всіх авторів однакова.*

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

25. Osypenko V. I. Localization criteria of the electrochemical machining process using cylindrical wire electrodes / Osypenko V. I., Plakhotnyi O. P., Timchenko O. V. // Практическое значение современных научных исследований '2019 : сб. тезисов междунар. науч. конф., 8–9 апр. 2019 г. – Одесса, 2019. – С. 5–8.

26. Osypenko V. Features of the single crater geometry formation in wire electrical discharge machining using modern current generators / Osypenko V., Plakhotnyi O., Timchenko O. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 трав. 2019 р. – Чернігів, 2019. – С. 47–48.

27. Плахотний О. П. Моделирование потока электролита та оцінка його впливу на процеси анодного розчинення при електрохімічній обробці дріт'яним електродом / О. П. Плахотний, А. Ю. Денисенко // Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences : сб. наук. праць Міжнар. наук.-практ. конф., Dec. 27–28, 2017. – Radom, Republic of Poland, 2017. – С. 130–134.

28. Осипенко В. І. Моделирование работы сопла для технологического комплекса электроерозийной та електрохімічної обробки / Осипенко В. І., Плахотний О. П., Денисенко А. Ю. // Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів «ТК-2016» : сб. наук. праць ІV Міжнар. наук.-техн. конф., 26–28 трав. 2016 р. – Луцьк, 2016. – С. 36.

29. Плахотный А. П. Моделирование процессов разрушения поверхностных слоев инструментальных сталей при электрохимической обработке проволоочным электродом / Плахотный А. П., Осипенко В. И., Билан А. В. // Актуаль-

ные проблемы прочности : материалы 51-й междунар. конф., 16-18 мая 2011 г. – Харьков, 2011. – С. 215–216.

30. Автоматизированный электроэрозионный вырезной станок на линейных двигателях с газовой смазкой в направляющих / С. П. Поляков, А. И. Карогодский, В. И. Осипенко, Т. Б. Юхмич, А. П. Плахотный // Аэрокосмический комплекс: конверсия и технологии : тезисы докл. науч.-техн. конф., 11-14 сент. 1995 г. – Житомир, 1995. – С. 103–104.

31. Плахотный А. П. Электроэрозионная обработка и эксплуатация фасонных фрез / Плахотный А. П., Поляков С. П., Постригань С. П. // Высокоэффективные технологии в машиностроении : материалы конф., 28-30 окт. 1998 г. – Харьков, 1998. – С. 69.

32. Осипенко В. И. Моделирование и управление технологическим процессом 4-х координатной электроэрозионной обработки / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Поляков С. П. // Автоматика – 97 : праці 4-ї Укр. конф. з автоматичного управління, 23-28 черв. 1997 р. – Черкаси, 1997. – Т. V. – С. 70.

33. Осипенко В. И. Математические и технологические аспекты САПР 4-х координатной электроэрозионной обработки / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Поляков С. П. // Оснастка-97 : тезисы докл. науч.-техн. конф., 20-21 марта 1997 г. – К., 1997. – С. 33–35.

34. Осипенко В. И. Исследование прогибов проволочного электрода-инструмента и оптимизация стратегии обработки сложноконтурных деталей / Осипенко В. И., Плахотный А. П., Поляков С. П. // Высокоэффективные технологии в машиностроении : тезисы докл. на Междунар. конф., посвящ. 100-летию КПИ. – Алушта, сентябрь 1996 г.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

35. Осипенко В. І. Розрахунок прогину дрітного електрода при 4-координатній електроерозійній різці / В. І. Осипенко, О. П. Плахотний // Експрес-новини: наука, техніка, виробництво. – 1997. – № 19–20. – С. 17–18.